



Projecte Fi de Carrera

Enginyeria de Telecomunicació

Estudi de viabilitat tecnològica de tags RFID sobre diferents substrats

Pau Aguilà Moliner

Director: Jordi Bonache Albacete

Departament d'Enginyeria Electrònica

**Escola d'Enginyeria
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)**

Febrer 2013



El sotasignant, *Jordi Bonache Albacete*, Professor de l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el projecte presentat en aquesta memòria de Projecte Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne *Pau Aguilà Moliner*.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, *4 de Febrer de 2013*.

Signatura: *Jordi Bonache Albacete*

Agraïments

A tot el grup CIMITEC i especialment al meu director, Jordi Bonache Albacete, per donar-me la possibilitat de poder treballar amb ells.

Als professors Enric Martí i Jordi Marin, per la desinteressada i generosa col·laboració prestada durant el procés de realització del projecte.

Als meus amics, companys i familiars (sobretot la meua àvia), pel suport incondicional que m'han proporcionat en tot aquest temps.

Índex de Continguts

1.	Introducció.....	8
1.1	Motivació.....	8
1.2	Objectius.....	8
1.3	Organització del projecte.....	9
2.	Caracterització d'un sistema RFID.....	10
2.1	Introducció als sistemes d'identificació automàtica.....	10
2.2	Tecnologia RFID.....	12
2.3	Elements d'un sistema RFID.....	13
2.3.1	Etiqueta (tag).....	13
2.3.2	Lector (reader).....	15
2.4	Principis bàsics de funcionament.....	15
2.4.1	Acoblament inductiu.....	16
2.4.2	Acoblament backscatter.....	17
2.4.3	Close coupling.....	18
2.5	Regulació i estandarització.....	18
2.6	Classificació dels sistemes RFID.....	20
2.7	Aplicacions dels sistemes RFID.....	21
2.8	Bibliografia.....	23
3.	Introducció a Printed Electronics.....	24
3.1	Què és Printed Electronics?.....	24
3.2	Sistemes d'impressió.....	25
3.2.1	Flexografia (Flexography).....	26
3.2.2	Gravat (Rotogravure).....	27
3.2.3	Òfset (Offset Lithography).....	27
3.2.4	Serigrafia (Screen Printing).....	28
3.2.5	Injecció de tinta (Inkjet).....	28
3.2.6	Altres tècniques.....	30
3.3	Propietats de les tintes i materials.....	31
3.4	Aplicacions i perspectives.....	32
3.5	Bibliografia.....	35
4.	Disseny de Tags RFID per a UHF.....	36
4.1	Requisits i procés de disseny.....	36
4.2	Configuració d'un Tag RFID (I).....	37
4.2.1	Anàlisi teòric del model.....	37
4.2.2	Simulació del prototip.....	39
4.3	Configuració d'un Tag RFID (II).....	45
4.3.1	Anàlisi teòric del model.....	45
4.3.2	Simulació del prototip.....	47
4.4	Avaluació del rendiment.....	51
4.5	Bibliografia.....	55
5.	Implementació i resultats experimentals.....	56
5.1	Procés de fabricació i mesura.....	56
5.2	Bibliografia.....	60
6.	Conclusions.....	61
7.	Annexes.....	63
7.1	Característiques de les tintes conductores (I).....	63
7.2	Característiques de les tintes conductores (II).....	64

Índex de Figures

Figura 1.1 Planificació temporal del projecte.....	9
Figura 2.1 Sistemes més importants d'identificació automàtica [I]	10
Figura 2.2 Exemple de l'estructura d'un codi de barres amb codi EAN [I].....	11
Figura 2.3 Esquema principal d'un sistema RFID [II]	12
Figura 2.4 Diagrama de blocs d'un tag RFID [I]	13
Figura 2.5 Lector RFID portàtil a 13.56 MHz [III]	15
Figura 2.6 Sistema RFID amb acoblament inductiu [I]	16
Figura 2.7 Sistema RFID amb acoblament backscatter [II]	17
Figura 2.8 Sistema RFID amb close coupling [I]	18
Figura 2.9 Sistemes RFID en funció de la seva memòria i funcionalitat [I]	20
Figura 2.10 Característiques dels sistemes RFID [I]	21
Figura 2.11 Tag RFID comercial semi-actiu [VI]	22
Figura 2.12 Creixement del mercat de RFID (2000 - 2005) [I]	22
Figura 3.1 Printed Electronics vs Electrònica Convencional (complementació) [I]	24
Figura 3.2 Printed Electronics vs Electrònica Convencional (implementació) [II]	25
Figura 3.3 Procés d'impressió (Flexografia) [IV]	26
Figura 3.4 Procés d'impressió (Gravat) [IV]	27
Figura 3.5 Procés d'impressió (Òfset) [IV]	27
Figura 3.6 Procés d'impressió (Serigrafia) [IV]	28
Figura 3.7 Procés d'impressió (Injecció de tinta) [III]	29
Figura 3.8 Efecte del drop spacing en línies impreses [V]	29
Figura 3.9 Mobilitat dels portadors en semiconductors (OE-A Roadmap 2007) [I]	32
Figura 3.10 Tags RFID impresos [II]	33
Figura 3.11 Cèl·lules PV impreses [II]	33
Figura 3.12 Roadmap tecnològic de printed electronics [I]	34
Figura 4.1 Tag RFID (dipol amb xarxa d'adaptació en T i circuit equivalent) [I]	38
Figura 4.2 Model circuital: versió balancejada (a) i desbalancejada (b) [II]	38
Figura 4.3 Model circuital del tag RFID amb pla de simetria [II]	38
Figura 4.4 Model circuital del tag RFID (aproximació) [II]	39
Figura 4.5 Paràmetre S_{11} (mòdul) en funció de les longituds L_1 i L_2 (mm)	40
Figura 4.6 Paràmetre S_{11} (mòdul) en funció de la posició de connexió de l'antena	40
Figura 4.7 Layout d'una etiqueta RFID amb Rogers RO3010	41
Figura 4.8 Representació de la densitat de corrent (en escala logarítmica) I	41
Figura 4.9 Pla E (dreta) i pla H (esquerra) del diagrama de radiació I	41
Figura 4.10 Layout d'una etiqueta RFID amb PET I	43
Figura 4.11 Paràmetre S_{11} (mòdul) del tag RFID de la Figura 4.10	43
Figura 4.12 Paràmetre $ S_{11} $ (dB) en funció de les longituds L_1 i L_2 (mm)	44

Figura 4.13	Paràmetre $ S_{11} $ (dB) en funció de la posició de connexió de l'antena	44
Figura 4.14	Layout d'una etiqueta RFID amb PET II.....	44
Figura 4.15	Esquemàtic d'una etiqueta RFID (cas general) [III]	46
Figura 4.16	Circuit equivalent d'un tag RFID per a UHF [III]	47
Figura 4.17	Model circuital d'elements concentrats d'un tag RFID	47
Figura 4.18	Paràmetre S_{11} (mòdul) del tag RFID de la Figura 4.17.....	48
Figura 4.19	Layout d'un tag RFID amb Rogers RO3010	48
Figura 4.20	Representació de la densitat de corrent (en escala logarítmica) II.....	48
Figura 4.21	Pla E (dreta) i pla H (esquerra) del diagrama de radiació II	48
Figura 4.22	Impedància d'entrada d'un tag RFID a la banda de UHF.....	50
Figura 4.23	Layout d'un tag RFID amb PET	50
Figura 4.24	Z_{IC} , Z_A i rang d'abast d'una etiqueta en funció de la freqüència [IV]	52
Figura 4.25	Read Range del tag de la Figura 4.7 (Rogers RO3010).....	53
Figura 4.26	Read Range del tag de la Figura 4.14 (PET).....	53
Figura 4.27	Read Range del tag de la Figura 4.19 (Rogers RO3010).....	54
Figura 4.28	Read Range del tag de la Figura 4.23 (PET).....	54
Figura 5.1	Procés de fabricació de tags RFID amb serigrafia.....	56
Figura 5.2	Etiquetes RFID impreses	57
Figura 5.3	Mesura del read range amb cambra anecoica (a) i cel·la TEM (b) [I].....	57
Figura 5.4	Intercanvi de dades entre lector (forward link) i tag (return link) [II] i [III]	58
Figura 5.5	Sistema de mesura RFID basat en una cel·la TEM [IV].....	59

Índex de Taules

Taula 2.1	Comparació dels diferents sistemes d'identificació automàtica [I].....	12
Taula 2.2	Consum de potència de diferents microxips de RFID	14
Taula 2.3	Pèrdues en espai lliure considerant $G_R = 1.64$ i $G_T = 1$ [I]	18
Taula 2.4	Freqüències de RFID definides pel UIT-R [IV]	19
Taula 2.5	Característiques i estàndards dels sistemes RFID [IV]	19
Taula 2.6	Classes EPC per a RFID [V]	21
Taula 3.1	Característiques dels diversos sistemes d'impressió [III].....	26
Taula 3.2	Propietats dels diversos sistemes d'impressió [III]	30
Taula 3.3	Classificació de les tintes utilitzades a printed electronics [III]	31
Taula 4.1	Resposta freqüencial del tag RFID (Rogers RO3010) I.....	42
Taula 4.2	Resposta freqüencial del tag RFID (PET) I.....	45
Taula 4.3	Resposta freqüencial del tag RFID (Rogers RO3010) II.....	49
Taula 4.4	Resposta freqüencial del tag RFID (PET) II	51

1. Introducció

1.1 Motivació

Els sistemes d'identificació automàtica (**Auto-ID**) permeten la identificació d'animals, persones i béns econòmics. En els darrers anys, aquests sistemes s'han desenvolupat molt ràpidament i han esdevingut molt populars en diferents sectors industrials com els serveis logístics o bé les cadenes de fabricació i distribució.

Els codis de barres, que fa bastant temps van significar una revolució en els sistemes d'identificació, actualment s'han tornat inadequats en un gran nombre de casos, atès que són sistemes molt barats però amb una capacitat d'emmagatzematge molt limitada.

La solució òptima en aquest cas seria la utilització de microxips amb major memòria per a emmagatzemar les dades (com per exemple a les *smart cards*). No obstant això, el contacte mecànic entre lector i tarja és sovint poc pràctic.

Gràcies a aquesta necessitat d'un sistema més flexible, això va donar lloc als sistemes d'identificació **RFID** ja que, entre d'altres, permet la transferència d'informació entre lector i microxip sense necessitat d'un contacte físic.

D'altra banda, els elements que integren una etiqueta **RFID** (és a dir, una antena i un microxip) es fabriquen per separat, així que el cost total s'incrementa al necessitar la hibridació d'aquests dos elements.

En aquestes circumstàncies, els mètodes de fabricació basats en *Printed Electronics* estan tenint molt ressò en aquest camp ja que faciliten la realització totalment impresa d'antenes per a *tags* **RFID**.

Per tant, això permet que aquests siguin flexibles i prims (podent així integrar-se en qualsevol objecte) i que el seu cost sigui molt barat. D'aquesta manera, per exemple, es podria etiquetar tots els productes d'un supermercat mitjançant la tecnologia **RFID** i no únicament els més cars degut al preu d'aquests *tags*.

1.2 Objectius

Aquest projecte consisteix en estudiar les tècniques de fabricació de *Printed Electronics* amb la finalitat de donar lloc a etiquetes **RFID** d'acord amb els estàndards actuals de cost i dimensions. Així doncs, es dissenyaran diferents *tags* **RFID** capaços de cobrir tota la banda **UHF** i centrats a 915 MHz sobre diverses classes de substrats (**Rogers RO3010** i **PET**) i tintes conductores (basades en plata i coure i en plata).

En primer terme, les etiquetes es modelaran electromagnèticament amb el *software* **ADS** (a partir de configuracions ja existents a la literatura) i es simularà la seva resposta en freqüència. Posteriorment, s'implementaran físicament i es compararan el resultats obtinguts amb els simulats.

La investigació es centrarà en determinar la viabilitat d'aquests mètodes de fabricació mitjançant l'anàlisi i mesura del rendiment dels *tags* a través del seu *read range*.

1.3 Organització del projecte

L'estructura d'aquest projecte està dividida en tres blocs principals:

El primer bloc el formen els capítols 2 i 3 i inclou tots els aspectes teòrics relacionats amb el funcionament, la caracterització i la implementació de *tags* **RFID**. És a dir, els conceptes principals sobre la tecnologia **RFID** i *Printed Electronics*, respectivament.

El segon bloc està constituït pel capítol 4 i en ell es troba pròpiament el procés de disseny dels *tags* **RFID**, començant per un anàlisi de la seva configuració i elaborant a continuació el seu model de simulació mitjançant el *software* **ADS**.

El tercer i últim bloc el compon el capítol 5 i es correspon amb la fabricació de les etiquetes **RFID** realitzades al capítol 4 mitjançant les tècniques descrites al capítol 3, així com la posterior mesura del seu rang d'abast (*read range*).

En segon terme, pel que fa a la planificació temporal del projecte, a la Figura 1.1 es mostra el **diagrama de Gantt** simplificat de les diferents tasques realitzades i les dependències entre elles.

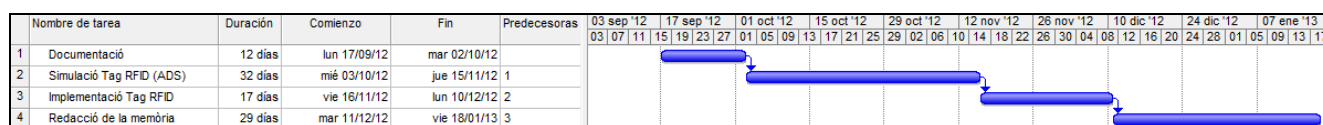


Figura 1.1 Planificació temporal del projecte

A continuació s'inclou una detallada descripció de cadascuna d'aquestes tasques:

- 1. Documentació:** Recerca inicial d'informació relacionada amb els fonaments de **RFID** i *Printed Electronics*. En aquesta tasca també s'inclou aprendre a utilitzar el *software* **ADS**.
- 2. Simulació Tag RFID (ADS):** Realització del model de simulació dels *tags* **RFID** mitjançant **ADS**. Dins d'aquest procés també s'emmarca l'estudi teòric de la seva estructura i la representació del seu *read range*, tal com es veurà en el capítol 4.
- 3. Implementació Tag RFID:** Procés de fabricació de les etiquetes **RFID** i mesura experimental del seu *read range*, com s'explicarà al capítol 5.
- 4. Redacció de la memòria:** Temps dedicat a l'elaboració de la memòria, d'acord amb el que s'estableix en aquest subapartat.

2. Caracterització d'un sistema RFID

Amb l'objectiu d'entendre detalladament els mètodes d'anàlisi i disseny de **tags RFID** utilitzats en els pròxims capítols, a continuació es descriuran els aspectes conceptuals més importants d'aquesta tecnologia, així com el seu funcionament i les aplicacions més destacables.

2.1 Introducció als sistemes d'identificació automàtica

D'acord amb la Figura 2.1, en aquest subapartat es mostrarà una breu descripció dels principals sistemes d'identificació automàtica que realitzen funcions similars a **RFID**.

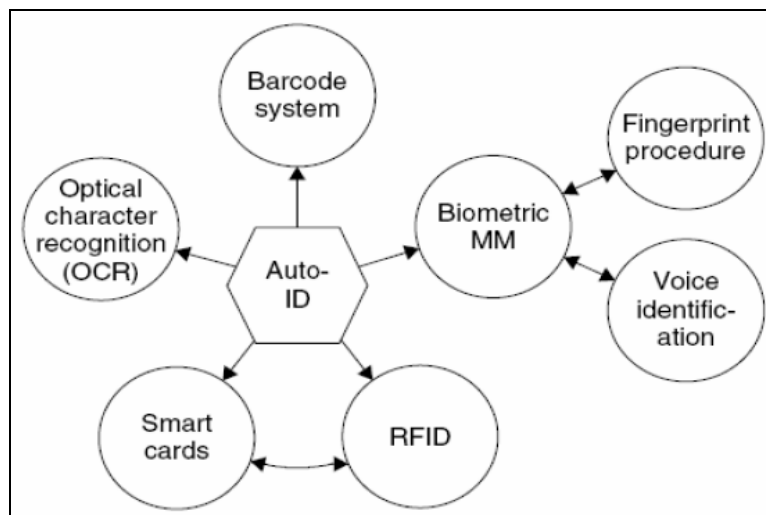


Figura 2.1 Sistemes més importants d'identificació automàtica [1]

- **Codi de barres**

Durant els últims 20 anys, ha sigut el sistema més utilitzat. És un codi binari constituït per un conjunt de barres i espais configurats paral·lelament, representant així unes dades que identifiquen un producte o element determinat.

Aquesta seqüència predeterminada pot ser interpretada de manera numèrica o alfanumèrica i es llegeix mitjançant l'escaneig amb un laser òptic (això és, la diferent reflexió difusa que pateix el feix del laser en funció de les barres negres o bé els espais en blanc). [1]

El codi de barres més utilitzat és el codi **EAN** (*European Article Number*), una evolució del codi nord-americà **UPC** (*Universal Product Code*) dissenyat especialment per al sector d'alimentació. Aquest codi està format per 13 dígits: l'identificador del país, l'identificador de l'empresa, el número de manufactura i el denominat "*check digit*", com es mostra a la Figura 2.2.

Country identifier		Company identifier					Manufacturer's item number					CD
4	0	1	2	3	4	5	0	8	1	5	0	9
FRG		Company Name 1 Road Name 80001 Munich					Chocolate Rabbit 100 g					

Figura 2.2 Exemple de l'estructura d'un codi de barres amb codi EAN [\[1\]](#)

A part d'aquests codis, existeixen altres codis de barres aplicats en d'altres camps industrials, com el codi **CODBAR** (sector mèdic), el codi 2/5 intercalat (indústria automobilística) o el codi 39 (processos logístics o llibreries).

- **Optical character recognition (OCR)**

Utilitzat per primer cop a la dècada dels anys 60, també és un sistema òptic com el codi de barres però permet una major densitat d'informació. Actualment s'utilitza a la producció, als camps administratius i a alguns bancs per al registre de xecs. [\[1\]](#)
El seu principal inconvenient és l'elevat preu i la complexitat dels lectors en comparació amb els d'altres sistemes.

- **Procediments biomètrics**

Aquests sistemes identifiquen a les persones a partir de la comparació inequívoca de les seves característiques físiques individuals. Els més populars són els reconeixements mitjançant les empremtes digitals (dactiloscòpia), la veu, l'escriptura o bé la retina (aquest últim no gaire comú). [\[1\]](#)

- **Targetes intel·ligents (Smart Cards)**

Les targetes intel·ligents són un sistema d'emmagatzematge de dades amb capacitat addicional per a processar-les (*microprocessor card*) normalment incorporades dins d'una targeta de plàstic de la mida d'una targeta de crèdit. L'alimentació es subministra mitjançant les superfícies de contacte entre la tarja i el lector, així com la transferència de dades utilitzant una interfície sèrie bidireccional (**port E/S**).

Un dels seus principals avantatges és la facilitat d'emmagatzemar informació, el seu baix cost i la seva protecció davant de possibles accessos indesitjats. D'altra banda, els seus desavantatges són la seva vulnerabilitat en front de la brutícia o la corrosió i l'alt cost de manteniment dels lectors. [\[1\]](#)

Es poden diferenciar dos grups de *smart card* segons el seu funcionament intern: “*memory cards*” i “*microprocessor cards*”. Als primers, s'accedeix a una memòria (usualment **EEPROM**) mitjançant una màquina d'estats i són poc funcionals però econòmics. Els segons, en canvi, posseeixen un microprocessador connectat a segments de memòria (**ROM**, **RAM** i **EEPROM**), són molt flexibles i poden realitzar més d'una aplicació.

• Comparació dels diferents sistemes

A la Taula 2.1 es mostra una taula comparativa entre els diversos sistemes d'identificació descrits anteriorment posant de relleu els seus punts forts i febles en relació amb el sistema en què es centra aquesta memòria, el **RFID**.

System parameters	Barcode	OCR	Voice recog.	Biometry	Smart card	RFID systems
Typical data quantity (bytes)	1–100	1–100	—	—	16–64 k	16–64 k
Data density	Low	Low	High	High	Very high	Very high
Machine readability	Good	Good	Expensive	Expensive	Good	Good
Readability by people	Limited	Simple	Simple	Difficult	Impossible	Impossible
Influence of dirt/damp	Very high	Very high	—	—	Possible (contacts)	No influence
Influence of (opt.) covering	Total failure	Total failure	—	Possible	—	No influence
Influence of direction and position	Low	Low	—	—	Unidirectional	No influence
Degradation/wear	Limited	Limited	—	—	Contacts	No influence
Purchase cost/reading electronics	Very low	Medium	Very high	Very high	Low	Medium
Operating costs (e.g. printer)	Low	Low	None	None	Medium (contacts)	None
Unauthorised copying/modification	Slight	Slight	Possible* (audio tape)	Impossible	Impossible	Impossible
Reading speed (including handling of data carrier)	Low ~4 s	Low ~3 s	Very low >5 s	Very low >5–10 s	Low ~4 s	Very fast ~0.5 s
Maximum distance between data carrier and reader	0–50 cm	<1 cm Scanner	0–50 cm	Direct contact**	Direct contact	0–5-m. microwave

*The danger of 'Replay' can be reduced by selecting the text to be spoken using a random generator, because the text that must be spoken is not known in advance.

**This only applies for fingerprint ID. In the case of retina or iris evaluation direct contact is not necessary or possible.

Taula 2.1 Comparació dels diferents sistemes d'identificació automàtica [\[1\]](#)

2.2 Tecnologia RFID

RFID (*Radio Frequency Identification*) és una tecnologia sense fils que permet la comunicació entre un lector i una etiqueta (*tag*) mitjançant comunicacions de radiofreqüència amb la finalitat de recuperar o bé emmagatzemar dades, com s'exposa a la Figura 2.3.

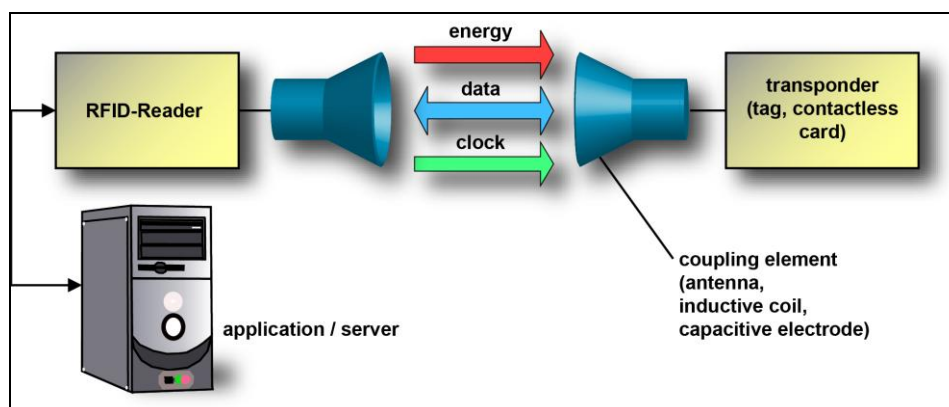


Figura 2.3 Esquema principal d'un sistema RFID [\[1\]](#)

Aquest **tag RFID** pot adherir-se a qualsevol objecte o animal i conté una antena i un microxip, el qual posseeix el nombre d'identificació del producte (dissenyat segons el codi **EPC**, això és, *Electronic Product Code*). D'aquesta manera, cada objecte tindrà un codi únic que el diferenciarà no solament d'altres classes de productes, sinó també de productes iguals. [\[2\]](#)

Els sistemes **RFID** funcionen en el rang freqüencial comprès entre 50 KHz i 2.5 GHz. A baixes freqüències (50 KHz – 14 MHz) els dispositius són de baix cost, tenen poc abast i són resistent al “soroll”. Així mateix, no necessiten llicència per tal d'operar.

A freqüències més altes (14 MHz – 2.5 GHz) les unitats tenen un major cost i una tecnologia més complexa.

Les etiquetes contenen informació que pot ser llegida o bé pot permetre l'escriptura, segons el tipus de memòria del *transponedor*. La majoria de sistemes posseeixen una memòria **EEPROM**.

D'altra banda, el **lector RFID** permet utilitzar sistemes anticòl·lisió a fi de llegir diverses targetes simultàniament i les emissions electromagnètiques de la seva antena no són perjudicials per a la salut (menys de la cinquena part de les d'un telèfon mòbil). [1]

Per al disseny i fabricació d'un sistema **RFID** s'han de considerar diferents factors com el rang d'abast on es pot mantenir la comunicació, la quantitat d'informació que pot emmagatzemar el *transponedor* o bé la velocitat del flux de dades entre lector i etiqueta, així com tenir en compte el nivell d'emissió per tal de no sobrepassar les regulacions imposades a cada país.

Tot i que **RFID** va aparèixer per primer cop als anys 80, actualment és una tecnologia madura, comercialitzable a gran escala, a l'abast de gairebé qualsevol organització i amb multitud d'aplicacions (sobretot en processos industrials i logístics). [2]

De fet, ja es comença a plantejar com a substituta dels codis de barres atès que supera les limitacions dels darrers (entre d'altres: la seva fragilitat, la necessitat de visibilitat directa o bé la seva reduïda capacitat d'emmagatzemar informació).

2.3 Elements d'un sistema RFID

Com s'ha mencionat a l'anterior subapartat, un sistema **RFID** està constituït per dos elements: una etiqueta (*tag* o *transponedor*) i un lector (*reader*).

2.3.1 Etiqueta (tag)

El *transponedor* (en anglès, *transmitter/responder*) està format bàsicament per una antena i un microxip. [1]

El microxip s'encarrega de processar el senyal rebut per l'antena i emmagatzemar la informació. En general, consta dels mòduls bàsics descrits a la Figura 2.4, variant la seva complexitat i configuració segons les necessitats de cada aplicació. Això és:

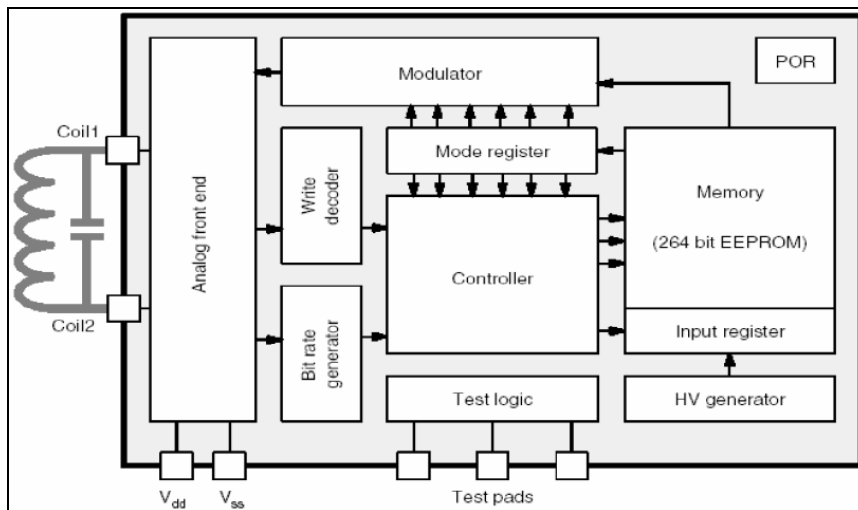


Figura 2.4 Diagrama de blocs d'un tag RFID [1]

- Memòria no volàtil on emmagatzemar les dades.
- Memòria **ROM** on emmagatzemar les instruccions bàsiques del seu funcionament.
- Memòria **RAM** on emmagatzemar dades durant la comunicació amb el lector.
- Altres components electrònics per a processar el senyal i les dades: filtres, etc...

D'altra banda, l'antena possibilita la comunicació amb el lector, ja que detecta i extreu l'energia del camp creat per ell (permetent així rebre el senyal del lector i retornar-li la seva resposta).

En segon terme, segons l'energia que utilitzen els *transponedors* per a la comunicació, podem diferenciar-ne tres classes:

- **Etiquetes passives:** no requereixen bateria ja que s'alimenten del camp electromagnètic generat pel lector per activar el microxip i establir la comunicació. Són les més econòmiques i amb menor rang d'abast, però degut a la seva relació entre rendiment i preu són les més utilitzades. [3]
- **Etiquetes semi-actives:** similars a les passives, però incorporen una petita bateria únicament per alimentar el xip. L'energia per a retornar la informació es realitza de la mateixa manera que als *tags* passius. Són més grans i cars que els passius, però aconsegueixen un millor rang de comunicació.
- **Etiquetes actives:** tenen una bateria pròpia per al subministrament d'energia, ja que no tenen suficient amb la proporcionada pel lector. L'alimentació serveix per activar el microxip i enviar el senyal a l'antena. Permeten un major abast, el procés de reescriptura i l'ús de memòries més grans (així com sensors addicionals). [3]
Per contra, el seu cost és bastant elevat i ofereixen una vida útil limitada (menys de 10 anys).

De la mateixa manera, com s'exposa a la Taula 2.2, normalment els *tags* **RFID** necessiten poca alimentació (de l'orde de mW).

	Memory (Bytes)	Write/read distance	Power consumption	Frequency	Application
ASIC#1	6	15 cm	10 μ A	120 kHz	Animal ID
ASIC#2	32	13 cm	600 μ A	120 kHz	Goods flow, access check
ASIC#3	256	2 cm	6 μ A	128 kHz	Public transport
ASIC#4	256	0.5 cm	<1 mA	4 MHz*	Goods flow, public transport
ASIC#5	256	<2 cm	~1 mA	4/13.56 MHz	Goods flow
ASIC#6	256	100 cm	500 μ A	125 kHz	Access check
ASIC#7	2048	0.3 cm	<10 mA	4.91 MHz*	Contactless chip cards
ASIC#8	1024	10 cm	~1 mA	13.56 MHz	Public transport
ASIC#9	8	100 cm	<1 mA	125 kHz	Goods flow
ASIC#10	128	100 cm	<1 mA	125 kHz	Access check

*Close coupling system.

Taula 2.2 Consum de potència de diferents microxips de RFID
En aquest cas: $V_{s-min} = 1.8 \text{ V}$, $V_{s-max} = 10 \text{ V}$ [1]

La mida i forma d'aquestes etiquetes també pot oscil·lar segons la seva aplicació, anant des de les desenes de centímetre utilitzats per a grans contenidors fins a *tags* de pocs mil·límetres utilitzats p. ex. en la facturació d'equipatges a l'aeroport. [1]

Pel que fa al cost, els *transponedors* actius solen ser més cars que el passius, així com aquells que treballen a una freqüència elevada o bé són circuitament més complexos.

Actualment, una etiqueta passiva pot costar al voltant de 0.15 \$ i una activa al voltant de 15 \$. [\[4\]](#)

2.3.2 Lector (reader)

L'altre element principal d'un sistema **RFID** és el lector. És el dispositiu encarregat de detectar els *tags* dins d'una àrea d'acció determinada mitjançant un senyal de **RF**. Es poden classificar en dos tipus diferents:

- **Sistemes amb una antena:** la mateixa antena serveix per transmetre l'energia i les dades. Són més simples i més barats, però tenen menys abast. [\[3\]](#)
- **Sistemes amb dues antenes:** amb una antena es transmet la informació i amb l'altra es transmet l'energia. Són més cars, però tenen més prestacions.

Alguns lectors també incorporen un *display* per a mostrar les dades llegides del *tag*, com es pot observar a la Figura 2.5.

No obstant això, la majoria tenen una interfície (**USB**, **RS232**, etc...) que permet connectar-lo a un ordinador o dispositiu de control, el qual incorpora una base de dades amb informació dels productes i un *software* per a processar-la. [\[3\]](#)



Figura 2.5 Lector RFID portàtil a 13.56 MHz [\[III\]](#)

Els lectors **RFID** poden variar en grandària, funcionalitat i cost en funció de la complexitat i sofisticació del *transponedor*. També poden treballar a més d'una freqüència.

2.4 Principis bàsics de funcionament

Com es mostra a la Figura 2.3, el funcionament d'aquest sistema és, a priori, bastant senzill. El lector emet un senyal mitjançant ones de radiofreqüència per a interrogar tots els *tags* que es troben dins del seu rang d'abast. Els *tags* que captin aquest senyal l'utilitzaran per a activar el seu microxip, processar el senyal i transmetre la informació emmagatzemada a la seva memòria (número de sèrie, codi **EPC**, etc...) a través de la seva antena. [\[1\]](#)

En cas que el *tag* sigui actiu, i per tant no necessiti el senyal del lector per a activar-se, també es podria iniciar la comunicació enviant la informació directament al lector.

També és important destacar que en **RFID** la transferència i recepció de bits es realitza de manera asíncrona i que al senyal amb les dades se li aplica una modulació **ASK**, **FSK** o bé **PSK**.

Finalment, un cop el lector ha rebut la informació la descodifica i, si disposa d'un *display*, mostrarà les dades directament. En cas contrari, les transferirà a un *host* per tal que les utilitzi. [1]

Paral·lelament, atès que els sistemes **RFID** poden treballar a diversos rangs de freqüència, la comunicació entre el lector i l'etiqueta serà diferent. D'aquesta manera, es poden classificar en tres grups: els sistemes basats en l'acoblament inductiu, els basats en l'acoblament *backscatter* i els "*close coupling*".

2.4.1 Acoblament inductiu

El funcionament dels sistemes **RFID** amb acoblament inductiu es basa en els mateixos principis de funcionament dels transformadors, és a dir, en l'acoblament entre la bobina del lector i el *tag*, tal com s'il·lustra a la Figura 2.6. [1]

Per tal que es compleixin aquestes propietats, la distància entre les bobines ha de ser menor a $\lambda/2\pi$ i, per tant, el *transponedor* ha d'estar dintre de la zona de camp proper de l'antena transmissora.

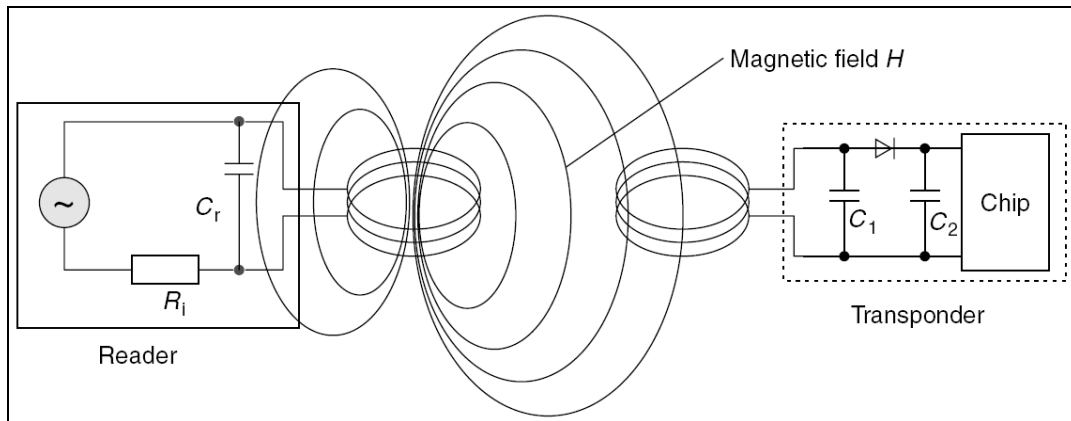


Figura 2.6 Sistema RFID amb acoblament inductiu [1]

Aquest tipus de sistema treballa en el rang de freqüències comprès entre 135 KHz i 13.56 MHz i, per tant, la longitud d'ona utilitzada és elevada (entre 2400 m i 22.1 m) i considerablement més gran que la distància entre el lector i el *tag*.

Per aquest motiu, el camp electromagnètic generat es pot considerar simplement com un camp magnètic variable amb el temps.

D'altra banda, tant la bobina del lector com del *transponedor* estan connectades paral·lelament a un condensador, format així un circuit ressonant paral·lel a la freqüència d'operació (freqüència de ressonància). [1]

A aquesta freqüència, apareixen grans corrents a ambdues bobines que s'utilitzen per a produir el camp electromagnètic. Aleshores, quan una part del camp creat pel lector penetra a la bobina del *tag*, es genera una tensió a l'antena per inducció.

Aquest voltatge és posteriorment rectificat i s'utilitza per a alimentar el microxip que conté la informació.

A diferència dels sistemes amb acoblament capacitiu, els inductius abasten el 80% dels sistemes de **RFID**. Normalment el seu rang d'abast està comprès al voltant de 1 m i sempre utilitzen etiquetes passives.

Així mateix, l'eficiència d'energia transmesa entre les antenes del lector i del *tag* és proporcional, entre d'altres, a la relació d'espores de les bobines o bé l'àrea compresa per l'antena del *transponedor*. [1]

En últim terme, aquests sistemes utilitzen tres classes diferents de transferència de dades entre *tag* i lector: *Load modulation*, *Load modulation with subcarrier* i *Subhamonic procedure*.

2.4.2 Acoblament backscatter

Aquests sistemes **RFID** treballen en el rang freqüencial de **UHF** (entre 860 MHz i 960 MHz) o microones. Per tant, la seva longitud d'ona és curta i això permet construir antenes amb dimensions més reduïdes i amb major eficiència i que el rang d'abast sigui superior a 1 m (coneguts també com a “*long-range systems*”).

Al utilitzar ones electromagnètiques en aquestes freqüències es pot operar a la zona de camp llunyà de les antenes i es pot aconseguir una distància de lectura de fins a 10 m amb *tags* passius i de 70 m amb *tags* actius. [1]

Com es mostra a la Figura 2.7, el lector emet una ona electromagnètica i una part de la seva potència és absorbida per l'antena del *tag*. Això genera una tensió que, un cop rectificada, serveix per a alimentar el xip. L'altra proporció de senyal es reflexa i retorna al lector (l'eficiència amb què això es realitza es coneix com a *reflection cross-section*).

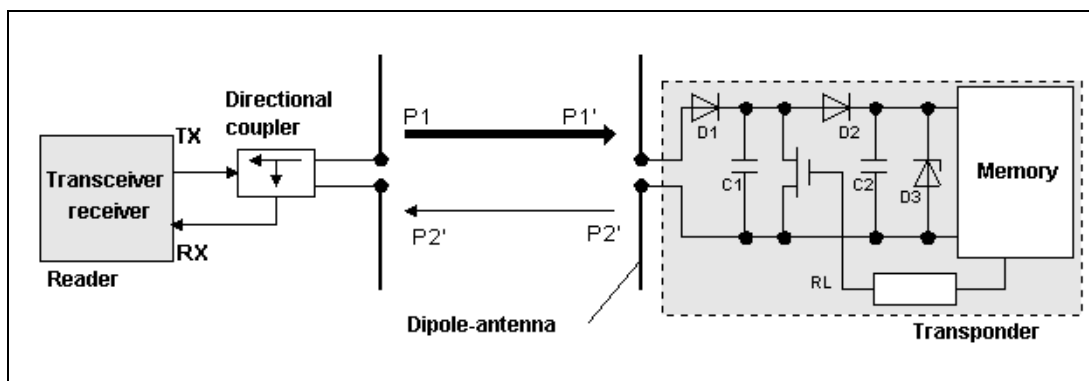


Figura 2.7 Sistema RFID amb acoblament backscatter [1]

El *transponedor* modula la senyal reflectida variant la impedància de càrrega (per exemple, mitjançant un transistor **FET**) en funció de les dades que vol transmetre.

El lector rep una part de la senyal reflectida i amb un circulator la separa respecte de la que ell mateix ha transmès. [1]

Pel que fa a l'energia necessària per a la transmissió de la informació, en aquest cas les pèrdues en espai lliure (en funció de la distància entre lector i *tag*) és un factor a tenir en consideració, com s'exposa a la Taula 2.3.

Anàlogament, utilitzant la tecnologia de semiconductors de baix corrent els microxips dels *transponedors* poden operar amb un consum menor a 5 μ W.

Distance r	868 MHz	915 MHz	2.45 GHz
0.3 m	18.6 dB	19.0 dB	27.6 dB
1 m	29.0 dB	29.5 dB	38.0 dB
3 m	38.6 dB	39.0 dB	47.6 dB
10 m	49.0 dB	49.5 dB	58.0 dB

Taula 2.3 Pèrdues en espai lliure considerant $G_R = 1.64$ i $G_T = 1$ [1]

2.4.3 Close coupling

Aquesta classe de sistemes estan dissenyats per a rangs d'abast compresos entre 0.1 cm i un màxim de 1 cm. El seu funcionament és similar al d'un transformador: una corrent alterna d'alta freqüència que circula per les espirs de la bobina del lector (espires primàries) genera un camp magnètic que es transmet a les espirs de la bobina del tag (espires secundàries), com s'observa a la Figura 2.8. [1]
Aquesta energia és rectificadada i serveix per a alimentar el xip i transmetre les dades.

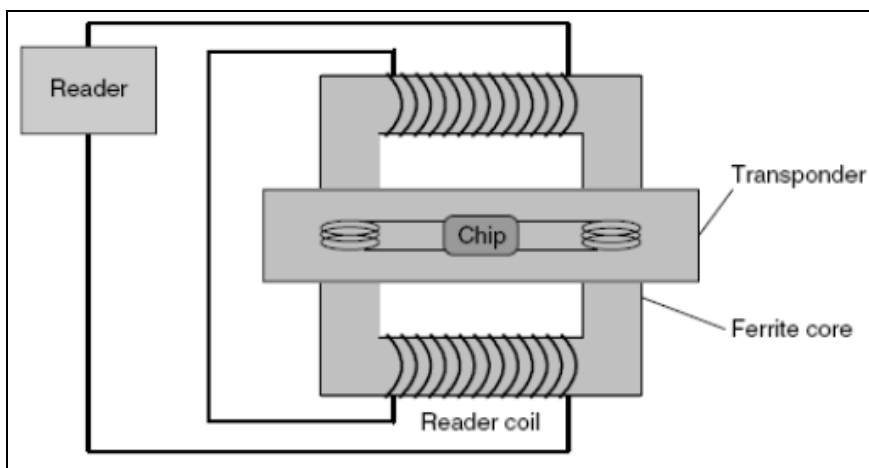


Figura 2.8 Sistema RFID amb close coupling [1]

Per tal que es produeixi la comunicació, l'etiqueta s'ha de situar al centre de l'arc que forma la bobina amb el lector.

En aquest cas, el sistema està dissenyat per a *transponders* que necessiten una major eficiència de potència transmesa entre lector i etiqueta (per exemple, tags amb microprocessadors).

2.5 Regulació i estandarització

Els sistemes de **RFID** es poden classificar com a sistemes radioelèctrics i, per tant, els senyals que emeten poden interferir amb els d'altres serveis (televisió, telefonia mòbil, etc...). A fi d'evitar-ho, s'utilitzen uns rangs de freqüència reservats específicament per a aplicacions industrials, científiques o mèdiques coneguts com **ISM** (*Industrial-Scientific-Medical*). [2]

Actualment no hi ha cap organisme públic global que regeixi el rang freqüencial en què treballen aquests sistemes, així que cada país posseeix les seves pròpies institucions (com la **FCC** als Estats Units o bé la **CEPT** a Europa) mitjançant les quals regula individualment el nivell de potència permès o l'ample de banda de cada canal, tal com s'exposa a la Taula 2.4.

a. LF Band (119–135 kHz)			
USA/Canada	Europe	Japan	China
2400/(f(kHz)) ^μ V/m @ 300m	119 – 127 kHz: 66 dBμA/m @ 10 m 127 – 135 kHz: 42 dBμA/m @ 10 m	30 V/m @ 3m	P _{peak} < 1W
b. HF Band (13.56 MHz)			
USA/Canada	Europe	Japan	China
13.553–13.567 MHz 42 dBμA/m @ 10 m	13.553–13.567 MHz 42 dBμA/m @ 10 m	13.553–13.567 MHz 42 dBμA/m @ 10 m	13.553–13.567 MHz 42 dBμA/m @ 10 m
c. UHF Band (860-960 MHz)			
USA/Canada	Europe ¹	Japan	China
902 – 928 MHz P _{e.i.r.p.} ² = 4W	865.0 – 868.0 MHz P _{e.i.r.p.} = +20 dBm 865.6 – 868.0 MHz P _{e.i.r.p.} = +27 dBm 865.6 – 867.6 MHz P _{e.i.r.p.} = +33 dBm	952 – 955 MHz P _{e.i.r.p.} = 1 W +6dB antenna gain = 4 W	840.5 – 844.5 MHz P _{e.i.r.p.} = 2 W 920.5–924.5 MHz P _{e.i.r.p.} = 2 W (Available since May 2007)
d. Microwave Band (2.45 GHz)			
USA/Canada	Europe	Japan	China
2.400 – 2.483 GHz P _{e.i.r.p.} = 4W	2.446 – 2.454 GHz P _{e.i.r.p.} = 500 mW or 4 W (indoors)	2.400 – 2.4835 GHz 3 mW/MHz(P _{e.i.r.p.} = 1 W)	2.400 – 2.425 GHz 250 mW/m @ 3 m (P _{e.i.r.p.} = 21 mW)
¹ Listen-before-talk for 200 kHz channels. ² Equivalent isotropically radiated power (e.i.r.p) = 1.64 × Effective Radiated Power (e.r.p.)			

Taula 2.4 Freqüències de RFID definides pel UIT-R [IV]

De la mateixa manera, també tenen una gran importància els organismes (com **ISO** o **EPC Global**) que desenvolupen els diversos estàndards que posseeix **RFID**. [2] Aquests especifiquen, entre d'altres, els aspectes tècnics de la comunicació (com el mecanisme de transmissió de dades, el *bit rate* requerit, etc...) o les dimensions físiques del *tag* segons quina sigui la seva aplicació, com es mostra a la Taula 2.5.

Frequency range	< 135 KHz [LF]	13.56 MHz [HF]	860–960 MHz [UHF]	2.45GHz [Microwave]
Relevant standards	<ul style="list-style-type: none"> ISO 11784 & 11785 ISO/IEC 18000-2 ISO 14223-1 	<ul style="list-style-type: none"> ISO/IEC 18000-3 EPC class-1 ISO 15693 ISO 14443 (A/B) 	<ul style="list-style-type: none"> ISO/IEC 18000-6 EPC class-0, class-1 	<ul style="list-style-type: none"> ISO/IEC 18000-4
Typical read range	<0.5 m	~1 m	~4–5 m	~1 m
Tag type	Passive-inductive coupling	Passive-inductive coupling	Passive or active	Passive or Active
Typical applications	Access control, animal tagging, vehicle immobilizer	Smart cards, access control, payment ID, item-level tagging, baggage control, biometrics, libraries, transport, apparel	Supply chain pallet- and box-level tagging, baggage handling, electronic toll collection	Electronic toll collection, cold chain management, environment monitoring
Multiple tag read rate	Slower	Faster		
Ability to read near metal or wet surfaces	Better	Worse		
Passive tag size	Larger	Smaller		

Taula 2.5 Característiques i estàndards dels sistemes RFID [IV]

2.6 Classificació dels sistemes RFID

Com s'ha vist anteriorment als subapartats 2.3 i 2.4, els sistemes **RFID** es poden classificar seguint diversos criteris, ja sigui la freqüència a la qual treballen, l'alimentació dels *tags* o bé el principi de funcionament que utilitzen. [1]

D'acord amb la Figura 2.9, un altre criteri per a classificar aquests sistemes és segons el rang d'informació i la capacitat de processar dades de l'etiqueta, així com la mida de la seva memòria.

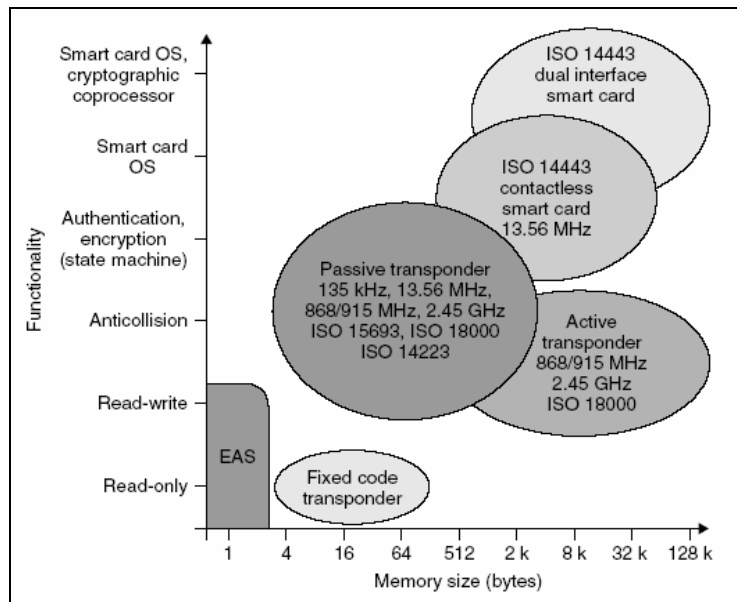


Figura 2.9 Sistemes RFID en funció de la seva memòria i funcionalitat [1]

D'aquesta manera, podem distingir tres grups diferents:

- **Sistemes Low-End:** els sistemes **EAS** (*Electronic Article Surveillance*) componen majoritàriament aquest conjunt. Són sistemes que reconeixen la presència d'un *tag* que es trobi dins del rang d'abast del lector. Els *transponders* de només lectura amb microxip també són sistemes *Low-End*, ja que tenen gravats permanentment les dades que generalment consisteixen únicament en el número de sèrie. [1]

Aquests sistemes són capaços de treballar en tot el rang freqüencial de **RFID** i són adients per a aplicacions que necessitin quantitats d'informació petites.

- **Sistemes Mid-Range:** aquests sistemes permeten l'escriptura de la seva memòria. La seva capacitat pot anar des d'uns pocs bytes fins a l'ordre de 100 Kilobytes amb una **EEPROM** (*transponders* passius) o una **SRAM** (*transponders* actius).

Tenen la capacitat de processar ordres simples de lectura per a la lectura/escriptura de les dades de la memòria i poden suportar processos anticollisió, així com procediments de xifratge de les dades i d'autenticació entre lector i *tag*.

També són capaços de treballar en tot el rang de freqüència de **RFID**. [1]

- **Sistemes High-End:** aquests sistemes posseeixen microprocessadors i un sistema operatiu de *smart card*, facilitant l'ús d'algoritmes d'autenticació i xifratge més complexos. Operen exclusivament a la freqüència de 13.56 MHz.

Anàlogament, els sistemes **RFID** també es poden classificar segons el tipus de memòria del *tag* (**EEPROM**, **FRAM** o **SRAM**), les opcions de programació de la memòria (**només lectura**, **WORM** o **lectura/escriptura**) o el procés de comunicació entre el lector i l'etiqueta (**Half/Full Duplex** o **Seqüencial**). [1]

A la Figura 2.10 es mostra un esquema de les diverses característiques dels sistemes **RFID** descrites prèviament.

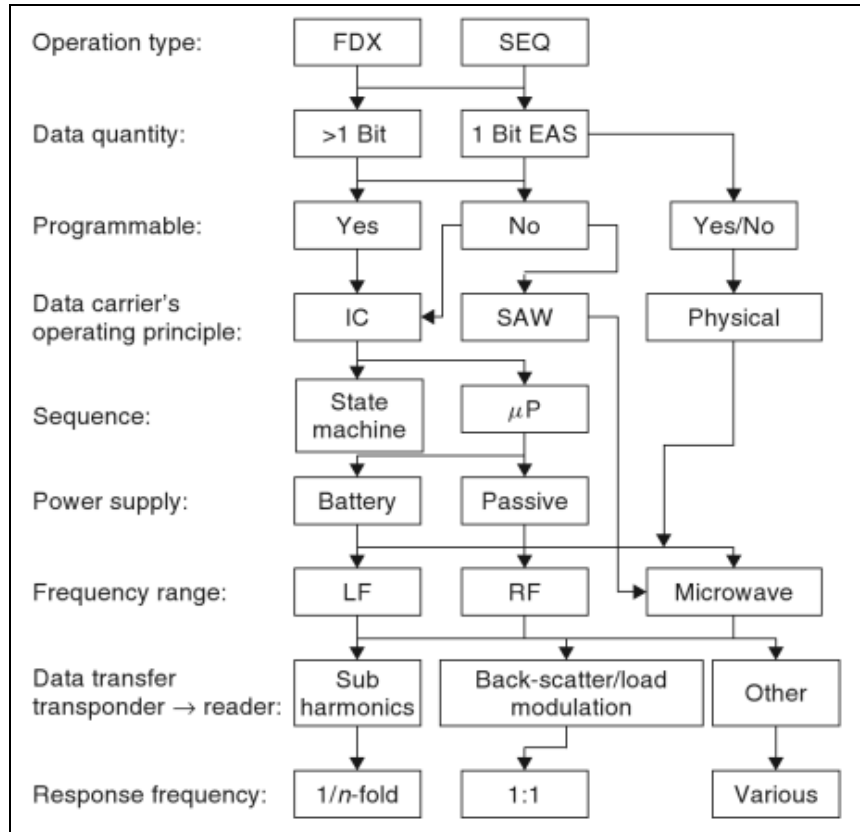


Figura 2.10 Característiques dels sistemes RFID [1]

D'altra banda, també cal destacar que, segons l'estàndard **EPC**, els *tags* **RFID** també es poden agrupar en set classes diferents, tal com s'il·lustra a la Taula 2.6.

Class	Description
Class 0	Passive, Read Only
Class 0+	Passive, Write once, Class 0 Protocol used
Class I	Passive, Write once, Read many
Class II	Passive, Read/Write, with encryption
Class III	Rewritable, Semi-Passive, Integrated Sensor
Class IV	Rewritable, Active Tag
Class V	All specification applied

Taula 2.6 Classes EPC per a RFID [V]

2.7 Aplicacions dels sistemes RFID

En els darrers anys la tecnologia **RFID** ha sofert un progrés molt elevat i s'ha començat a utilitzar en una gran varietat de sectors. Els àmbits en el qual ha tingut un major impacte són:

- **Control d'accés:** la integració dels sistemes **RFID** en una clau electrònica permet controlar l'accés a zones restringides d'una instal·lació, així com a petits pagaments amb màquines expenedores, etc... [1]
- **Gestió d'equipatges als aeroports:** facilita la localització de l'equipatge d'una persona a fi d'evitar-ne la seva pèrdua i conèixer l'avió en què ha de ser carregat, entre d'altres. En aquest cas, **RFID** és molt més eficaç que els codis de barres.
- **Peatges automàtics:** serveis com **TeleTac** utilitzen **RFID** per a agilitzar el procés de pagament de tarifes als usuaris i aixecar la barrera de manera automàtica sense necessitat d'aturar el vehicle, com s'exposa a la Figura 2.11.



Figura 2.11 Tag RFID comercial semi-actiu [VI]

- **Control d'articles a botigues:** es basa en la identificació d'objectes per a la seva gestió en una tenda o magatzem (localització, nombre d'unitats, etc...). D'aquesta manera, es pot tenir un millor control dels actius (la seva disponibilitat, etc...). [2]

A més d'aquests usos, **RFID** també es pot utilitzar per al control de la producció o del transport d'un producte, la identificació d'animals o persones (aplicació més polèmica) o bé al sector de la seguretat automobilística. [1]

En últim terme, a la Figura 2.12 es mostra l'evolució del mercat de **RFID** en funció de les aplicacions de cada sector.

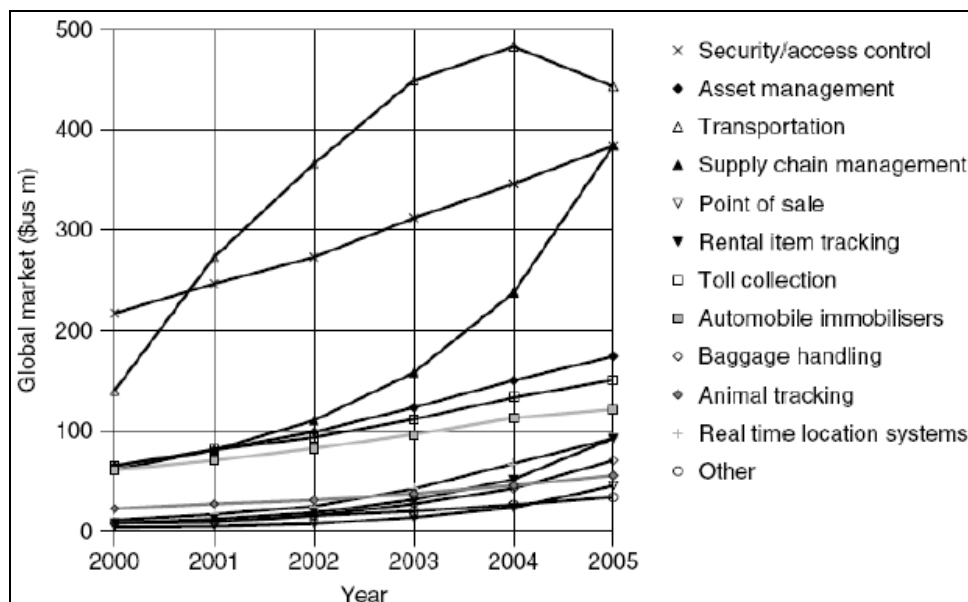


Figura 2.12 Creixement del mercat de RFID (2000 - 2005) [1]

2.8 Bibliografia

Llibres i pàgines web:

- [1] Klaus Finkenzeller, “*RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*”, John Wiley & Sons Ltd., 2nd edition, 2003.
- [2] V. Daniel Hunt et al., “*RFID: A Guide to Radio Frequency Identification*”, John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [3] Daniel M. Dobkin, “*The RF in RFID: passive UHF in RFID in practice*”, Elsevier Inc., 2008.
- [4] <http://www.atlasrfid.com/Technology/ActivevsPassive.aspx>

Imatges i taules:

- [I] Klaus Finkenzeller, “*RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*”, John Wiley & Sons Ltd., 2nd edition, 2003.
- [II] <http://rfid-handbook.de/about-rfid.html>
- [III] http://www.skyrfid.com/Readers_HF_1356.php
- [IV] Chawla, V.; Dong Sam Ha, “*An overview of passive RFID*”, IEEE Communications Magazine, pp. 11 – 17, 2007.
- [V] Thakare, Y.B.; Musale, S.S.; Ganorkar, S.R., “*A technological review of RFID & Applications*”, IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, pp. 65 – 70, 2008.
- [VI] Daniel M. Dobkin, “*The RF in RFID: passive UHF in RFID in practice*”, Elsevier Inc., 2008.

3. Introducció a Printed Electronics

Atès que en el següents capítols es realitzarà la fabricació d'un **tag RFID** mitjançant *printed electronics*, tot seguit s'explicarà detalladament les característiques d'aquesta nova tecnologia i es mostraran els sistemes d'impressió més destacats, així com alguns exemples d'aplicacions comercials.

3.1 Què és Printed Electronics?

Printed Electronics (PE) fa referència a la fabricació de dispositius electrònics (actius i passius) mitjançant tècniques d'impressió convencionals. [1]

El seu objectiu principal és la realització de sistemes electrònics sobre diferents classes de substrats barats i flexibles (paper, plàstic, ceràmica, etc...) utilitzant capes de tintes conductores basades en polímers, resistives, dielèctriques o semiconductores.

Per tant, es pot considerar una aplicació de la ciència anomenada *organic electronics*, ja que aquestes tintes són polímers basats en carboni.

En comparació amb l'electrònica convencional (basada en el silici), *printed electronics* es caracteritza per ser més simple i rentable. No obstant això, actualment està bastant limitada en termes de densitat d'integració o resolució (de l'orde de micròmetres).

Per aquest motiu, aquestes dues tecnologies són complementàries i no competidores directes, com s'exposa a la Figura 3.1. [2]

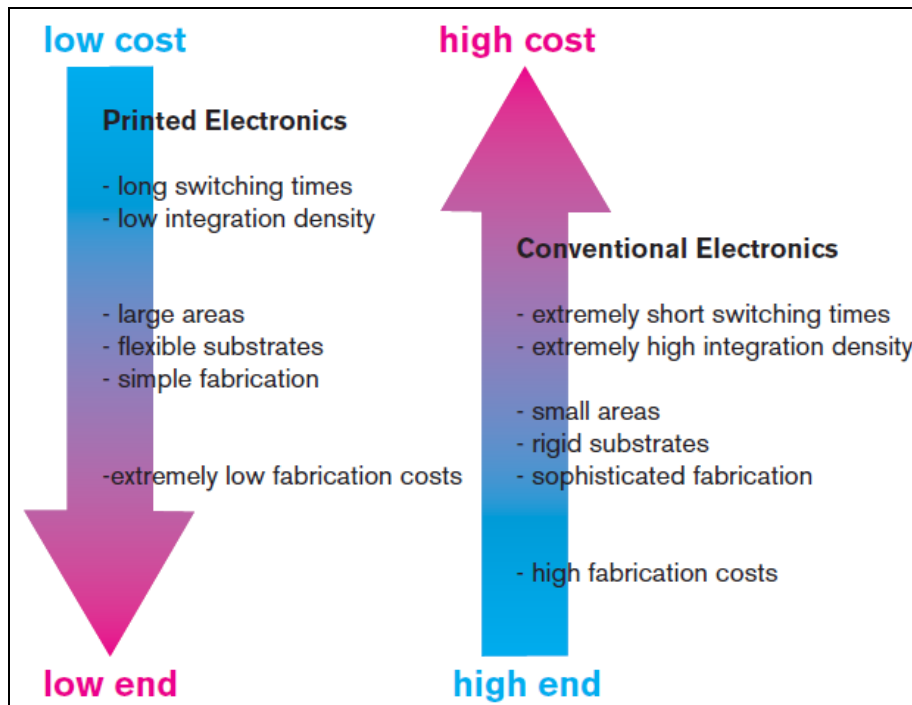


Figura 3.1 Printed Electronics vs Electrònica Convencional (complementació) [1]

Un altre avantatge de *printed electronics* és permetre la fabricació *roll-to-roll* (**R2R**), això és, el sistema de creació de dispositius electrònics en una bobina de substrat flexible i molt fi. D'aquesta manera, al no treballar amb oblies, s'abarateixen els costos de producció i és més senzill automatitzar el procés de fabricació. [1]

De la mateixa manera, amb aquestes tècniques d'impressió el sistema de realització seria additiu, és a dir, s'anirien afegint capes de les diverses tintes en zones específiques del substrat de manera selectiva i, per tant, no s'utilitzarien les tècniques convencionals de fotolitografia i atacat químic, com es mostra a la Figura 3.2. [1]

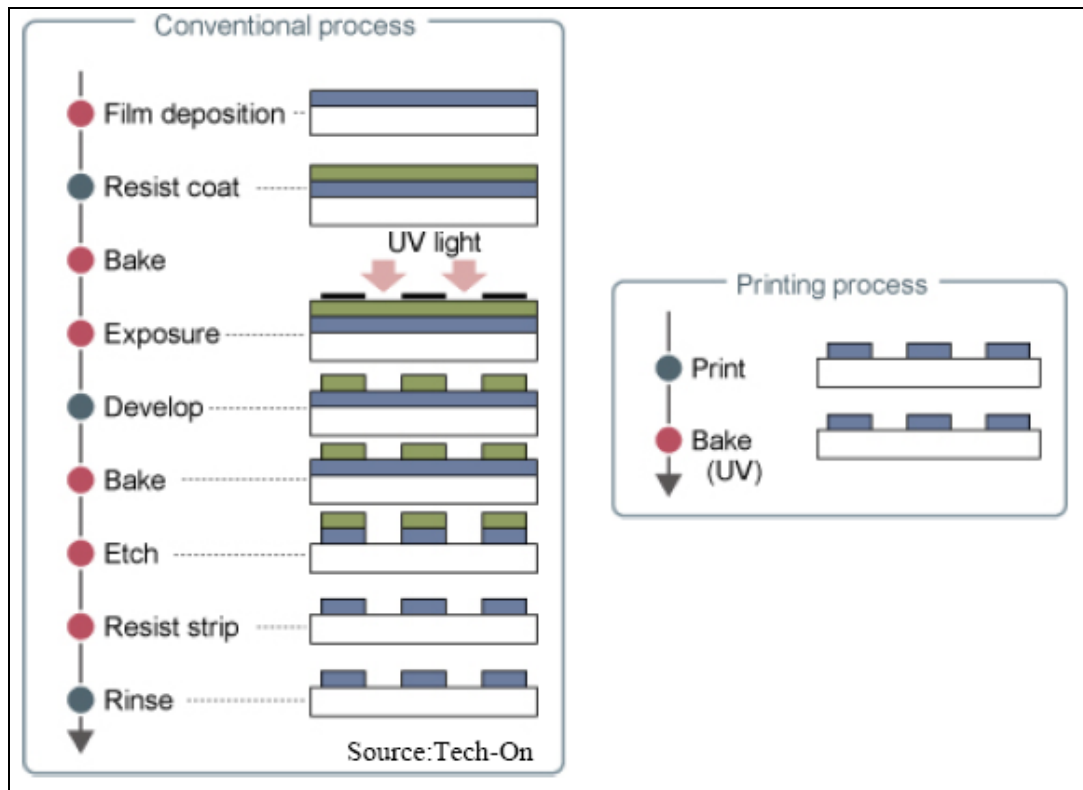


Figura 3.2 Printed Electronics vs Electrònica Convencional (implementació) [1]

Juntament amb el procés *roll-to-roll*, això faria possible treballar a menors temperatures i reduir els costos de manipulació dels substrats (al ser un procediment menys complex), així com els de gestió i tractament de residus.

En últim terme, també ens permetria realitzar circuits on el substrat no estigués limitat a l'àrea d'una obla (anomenats *large area electronics*). [2]

3.2 Sistemes d'impressió

En l'àmbit de *printed electronics* es fan servir diferents mètodes d'impressió tradicionals i estàndards (utilitzats àmpliament i des de fa molt temps a les arts gràfiques) adaptats a aquesta aplicació. Els més representatius són: **Injecció de tinta, Flexografia, Gravat, Òfset i Serigrafia**. [2]

Cadascun d'aquests sistemes té uns determinats atributs (resolució, rendiment, etc...) que s'han de considerar segons els requisits del nostre disseny o bé les característiques de les tintes, com es mostra a la Taula 3.1.

Dit això, a continuació es descriurà breument l'ús i funcionament d'aquestes tècniques.

	Flexography	Offset Lithography	Gravure Printing	Screen Printing	Inkjet Printing
Printing Form	Relief (polymer plate)	Flat (Al plate)	Engraved cylinder	Stencil and mesh	Digital
Typical Resolution (lines/cm)	60	100-200	100	50	60-250
Ink Viscosity (Pas)	0.05-0.5	30-100	0.01-0.2	0.1-50	0.002-0.1
Substrates	Paper, boards, polymers	Paper, boards, polymers	Coated paper and boards, polymers	All	All, 3D possible
Film Thickness (μm)	0.5-2	0.5-2	0.5-2	5-25	0.1-3
Line Width (μm)	20-50	10-15	10-50	50-150	1-20
Registration (μm)	<200	>10	>10	>25	<5
Throughput (m^2/sec)	10	20	10	<10	0.01-0.1
Printing Speed (m/min)	100-500	200-800	100-1000	10-15	15-500

Taula 3.1 Característiques dels diversos sistemes d'impressió [\[III\]](#)

3.2.1 Flexografia (Flexography)

La Flexografia és una tècnica basada en cilindres rotatoris, així com el **Gravat** i l'**Òfset**. Utilitza una placa elàstica feta de polímers que posseeix el patró a ser imprès mitjançant un relleu positiu. La impressió es produeix quan s'uneix la tinta al cilindre d'impressió a partir d'un rodet amb una textura gravada (**anilox roller**) que controla l'entintat. [\[2\]](#) Finalment, aquest cilindre es deixa girar sobre la superfície del substrat i es transfereix la tinta, com s'exposa a la Figura 3.3.

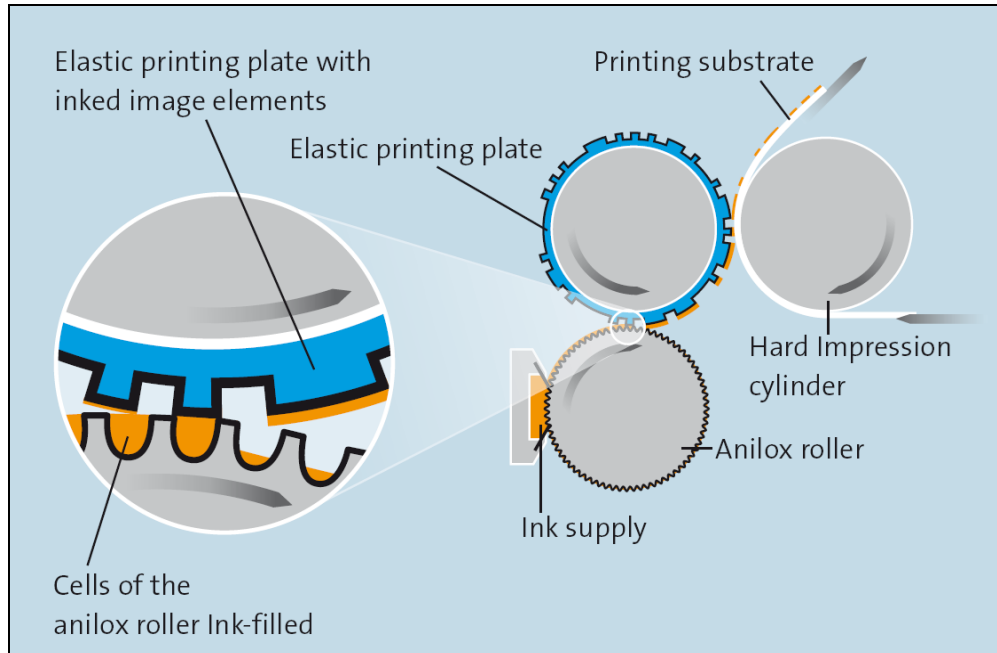


Figura 3.3 Procés d'impressió (Flexografia) [\[IV\]](#)

La qualitat que s'aconsegueix és suficient només per a aplicacions de baixa precisió, com per exemple la impressió d'embalatges. No obstant això, en comparació amb l'òfset litogràfic, permet l'ús d'una varietat més àmplia de tintes. D'altra banda, el seu principal desavantatge és que la tinta tendeix a formar aurèoles al voltant de les vores degut a la pressió del motlle elàstic. [\[3\]](#)

3.2.2 Gravat (Rotogravure)

En el **Gravat en relleu** s'utilitza la tècnica de la calcografia per a planxes cilíndriques. Això és: la imatge es transmet amb un relleu negatiu (al contrari que a la Flexografia) gravat en un cilindre (*gravure cylinder*). D'aquesta manera, tot el cilindre s'entinta i se'n retira l'excés amb una rasqueta (*blade*). [2]

Finalment, el substrat passa entre aquest rodet i el cilindre d'impressió i l'elevada pressió exercida fa que la tinta es transfereixi al substrat, com s'il·lustra a la Figura 3.4.

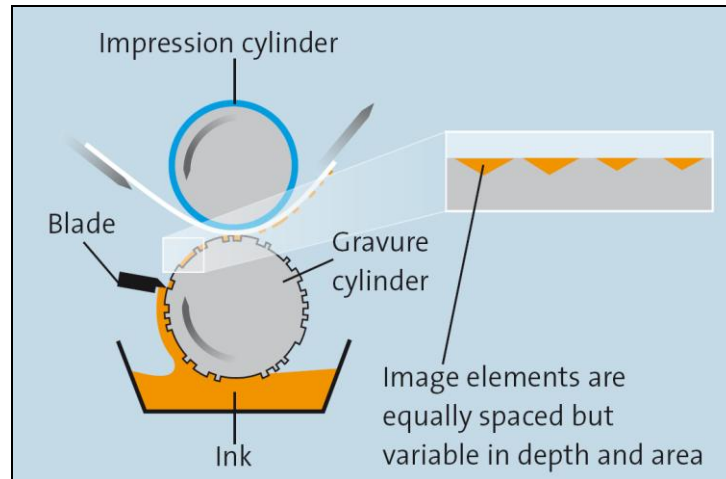


Figura 3.4 Procés d'impressió (Gravat) [IV]

Aquest procés permet una velocitat d'impressió molt alta i de gran qualitat [3], així com controlar la quantitat de tinta a transferir a fi d'aconseguir gruixos diferents al substrat.

3.2.3 Òfset (Offset Lithography)

El mètode d'**Òfset** segueix el mateix funcionament que el procés litogràfic, però amb la diferència que la imatge no està definida en el cilindre que està en contacte directe amb el substrat [2], atès que primer s'entinta el cilindre amb la imatge i després aquesta es transfereix a un segon rodet intermedi, és a dir, d'òfset, com es mostra a la Figura 3.5.

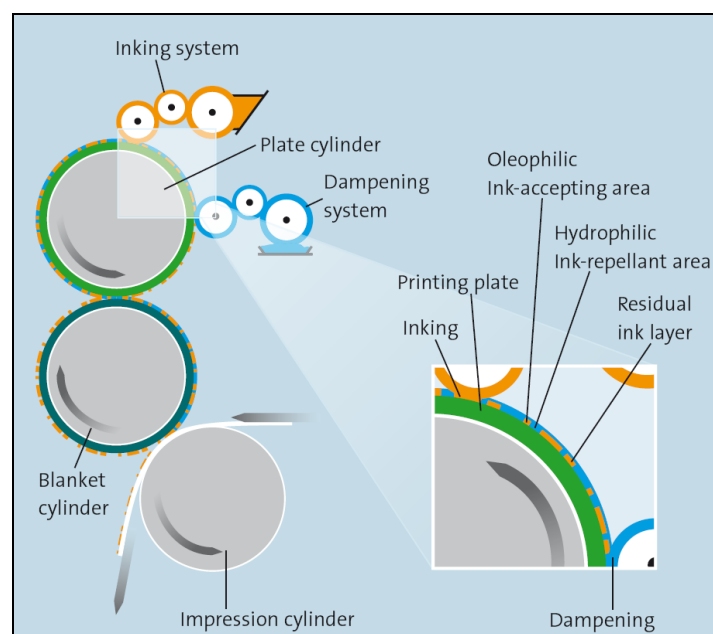


Figura 3.5 Procés d'impressió (Òfset) [IV]

El cilindre d'òfset típicament està fet d'un material flexible (p. ex. polímers) per tal de permetre un millor contacte amb la superfície del substrat, aconseguint així un increment de la qualitat (lleugerament inferior a l'obtinguda amb el **Gravat**). [2]
Anàlogament, l'ús d'aquest cilindre permet augmentar la vida útil de les plaques d'impressió ja que es redueix el desgast en comparació amb altres sistemes.
El seu principal inconvenient és que són requerides tintes amb una elevada viscositat.

3.2.4 Serigrafia (Screen Printing)

A diferència dels anteriors sistemes, la **Serigrafia** permet la impressió de dispositius en superfícies no planes i sense haver d'aplicar pressió contra el substrat (motiu pel qual també es coneix com *non contact printing process*). [2]

Utilitza una màscara opaca (*stencil screen*) que s'aplica a sobre d'una fina malla per tal de definir la imatge i obturar les zones on no es vol dipositar tinta. Finalment, a través de les seves obertures la tinta es transfereix a la superfície del substrat, com es pot comprovar a la Figura 3.6.

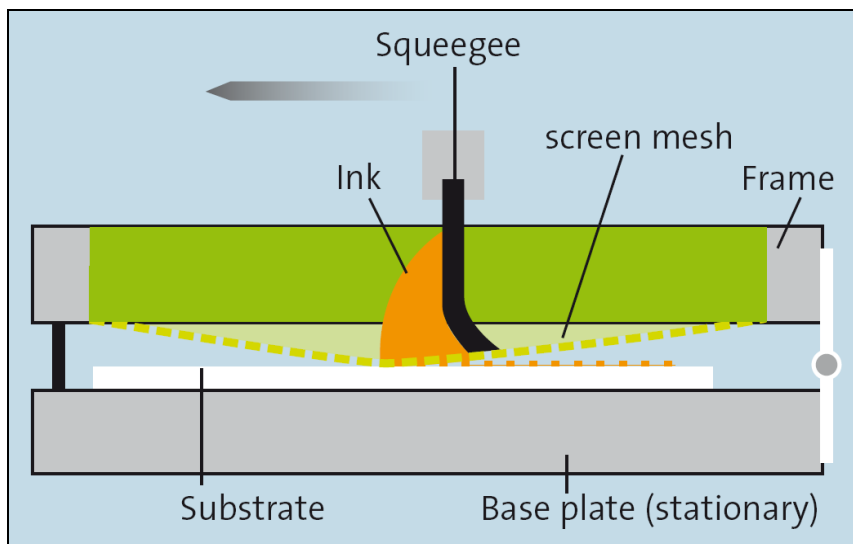


Figura 3.6 Procés d'impressió (Serigrafia) [IV]

La tinta es pot moure de la malla per efecte de la força capil·lar¹ i la quantitat de tinta que es transfereix es pot controlar segons el gruix de la malla. Aquesta tècnica també pot utilitzar malles cilíndriques o bé rotatòries. [3]

Degut a la seva flexibilitat, actualment la **Serigrafia** pot utilitzar-se en una gran varietat d'aplicacions, com l'estampació de roba o la fabricació de plaques de circuit.

3.2.5 Injecció de tinta (Inkjet)

La impressió digital posseeix molts avantatges: es generen menys residus pel que fa a productes químics, cada impressió pot ser diferent (fins i tot personalitzada) sense cost addicional, etc... Els mètodes més comuns d'aquesta classe són la **impressió làser**, **tèrmica** o d'**injecció de tinta**. [2]

La **injecció de tinta** permet la transferència de la tinta des dels capçals d'impressió mitjançant tres tecnologies diferents: **tèrmica**, **piezoelèctrica** o **contínua**.

¹ Capil·laritat: Propietat dels líquids que depèn de la seva tensió superficial que els hi confereix la capacitat de pujar o baixar per un tub molt estret i normalment de secció circular.

Amb la primera tècnica, l'escalfament d'una placa provoca una petita bombolla de gas que genera una gota de tinta. A la segona, la pressió que exerceix un transductor al canviar de forma (a partir d'un pols electromagnètic) força la tinta a sortir per la boca de l'ejector fins a crear una gota de tinta. [3]

Amb el darrer mètode, una pressió constant s'aplica a la tinta, produint un flux continu que posteriorment es controla per a produir gotes de diferents mides (típicament entre $50\mu\text{m}$ – $60\mu\text{m}$), com es pot apreciar a la Figura 3.7.

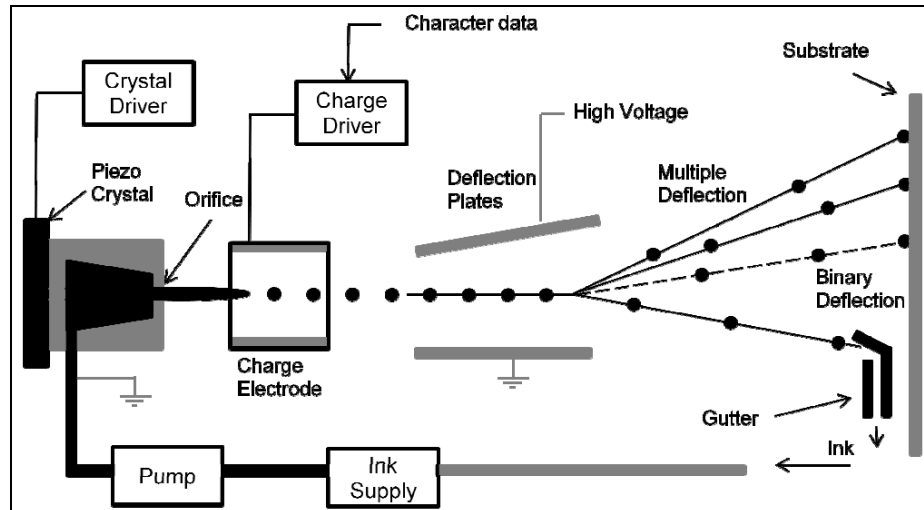


Figura 3.7 Procés d'impressió (Injecció de tinta) [III]

Aquest sistema posseeix una àmplia gamma d'aplicacions, entre las quals destaquen la fabricació de **MEMS** (*Microelectromechanical Systems*) o bé la impressió **3D**.

D'altra banda, un dels desavantatges de la **injecció de tinta** és que les fluctuacions en la trajectòria de les gotes de tinta poden afectar negativament al rendiment del dispositiu.

Un problema freqüent en aquest cas és el “*coffee-stain*”, on el material injectat tendeix a migrar cap a les vores del punt imprès. [4]

De la mateixa manera, les forces connectives que es produeixen quan una gota de tinta s'asseca tenen un impacte molt visible en la formació de línies no uniformes a partir d'un conjunt de gotes equiespaiades. [4]

Per exemple, si la separació és molt gran la gota s'assecarà abans de formar una línia contínua, com es pot observar a la Figura 3.8.

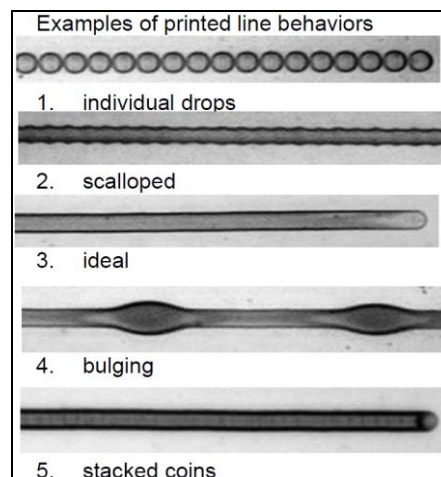


Figura 3.8 Efecte del drop spacing en línies imprèses [V]

3.2.6 Altres tècniques

En els anteriors subapartats s'han exposat els principals sistemes d'impressió, però també es poden mencionar d'altres tècniques més noves com la *nanoimprinting* (en què s'entinta el substrat i es pressiona contra el motlle del disseny) o bé la fotolitografia. [1] Atès que hi ha una gran varietat de mètodes, a la Taula 3.2 es mostra un breu resum esquematitzat dels seus atributs més importants.

Mass-printing methods/ Roll-to-roll: currently throughput of several 10.000 m ² /h	Flexographic printing	<ul style="list-style-type: none"> • Relatively cheap start-up due to use of rubber plates. • Incompatibility problem. Conventional plate materials (polymers) are not very compatible with "new" solvent systems used in printed electronics
	Gravure printing	<ul style="list-style-type: none"> • Allows printing of films with a wide range of thicknesses from 50nm to 5 µm • Good scalability of line width • Achievable high layer quality, high resolution/W
	Offset printing	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent control, fast high-volume production. • High-resolution • High start-up cost and start-up waste volumes • Very specific ink formulations are needed
Sheet-fed printing methods	Inkjet printing	<ul style="list-style-type: none"> • Most widely used today • Possible to use a wide range of substrates • Dominates research into printed transistors • Manufacturing viability still unclear • Throughput ~ 100 m²/h and limited resolution (micro scale) <ul style="list-style-type: none"> ◦ using multiple heads in parallel => yield problems • Drying phenomena important • Much cheaper than photolithograph process or vacuum processes. • Does not require any masks or template and can realize on-demand manufacturing • Low viscosity and low concentration ink formulations
	Screen printing	<ul style="list-style-type: none"> • Rather inexpensive • Highly flexible • Print layers ~20-100 µm • Limited resolution and throughput and line roughness compared to R2R • Most mature, has been used in some limited applications such as printing interconnections • Can be roll-to-roll as well
Step-by step printing/New methods	Stamping / nanoimprinting	<ul style="list-style-type: none"> • Similar to gravure printing • Patterned master is used to transfer a pattern onto a substrate • "Too early to comment their manufacturability"
	UV Lithography	

Taula 3.2 Propietats dels diversos sistemes d'impressió [III]

3.3 Propietats de les tintes i materials

Actualment, el principal repte de **PE** és el desenvolupament de nous materials, ja que aquestes tintes i substrats han de tenir unes determinades característiques (viscositat, rugositat, etc...) segons el procés d'impressió utilitzat i han de satisfer els requisits de disseny de cada dispositiu (per tal de no afectar al seu rendiment). [2]

En aquestes circumstàncies, a fi de realitzar circuits passius s'utilitzen, entre d'altres, tintes basades en partícules metàl·liques per als conductors, en pel·lícules de carboni per a les resistències i en polímers per als dielèctrics, com es pot observar a la Taula 3.3. Anàlogament, per als substrats l'elecció més comuna solen ser els polímers com el politereftalat d'etilè (**PET**), la poliamida (**PI**) o el naftalato de polietilè (**PEN**). [3]

Inks – Material for printing	
Conductors	<ul style="list-style-type: none"> • Conducting polymers • Metal flakes • Metal nanoparticles (e.g. Silver, Copper, Gold) • Metal-organic/metal-salt precursors • Carbon nano tube inks
Dielectrics => capacitors	<ul style="list-style-type: none"> • Inorganic oxides • Polymers • Self-assembled monolayers • Heterogeneous organic/inorganic mixtures
Resistors	<ul style="list-style-type: none"> • Carbon films
Others include e.g. Catalytic materials, Optical materials, and functional polymer materials.	

Taula 3.3 Classificació de les tintes utilitzades a printed electronics [III]

Recentment, una de les principals tendències a *printed electronics* és la utilització de tintes basades en nanopartícules. Això és degut fonamentalment a la reducció del punt de fusió d'aquestes nanopartícules (per sota de 250 °C) gràcies a un augment de la relació entre l'àrea de la seva superfície i el seu volum i al fet que són fàcilment solubles en dissolvents imprimibles. [4]

D'aquesta manera, les tintes es curen² a baixes temperatures i permeten l'ús de substrats de baix cost, a més de prevenir que es facin aglomeracions que provocarien mesclades poc homogènies.

Una altra classe de materials són els **ICP** (*Inherently Conducting Polymers*), descoberts al 1977 i que van portar als seus inventors a ser guardonats amb el Premi Nobel de Química l'any 2000 [5]. Aquests polímers poden tenir propietats conductores (coneguts com *organic metals*) i semiconductores. [2]

² Procés de curació: Conversió d'una pel·lícula de tinta humida a una seca, típicament per mitjans químics o per l'exposició a diferents tipus de radiació, com la llum ultraviolada (**UV**).

Els **ICP** en estat semiconductor (anomenats *organic semiconductors*) són de gran interès per a aplicacions electròniques atès que són compatibles amb les tècniques d'impressió directa.

Tot i que la seva mobilitat de càrregues és menor que la del silici, segons el *roadmap* de la **OE-A** (*Organic Electronics Association*) s'espera millorar-la en els propers anys, com s'il·lustra a la Figura 3.9. Això serà possible amb el desenvolupament i optimització dels polímers, així com nous materials (nanotubs de carboni, etc...). [2]

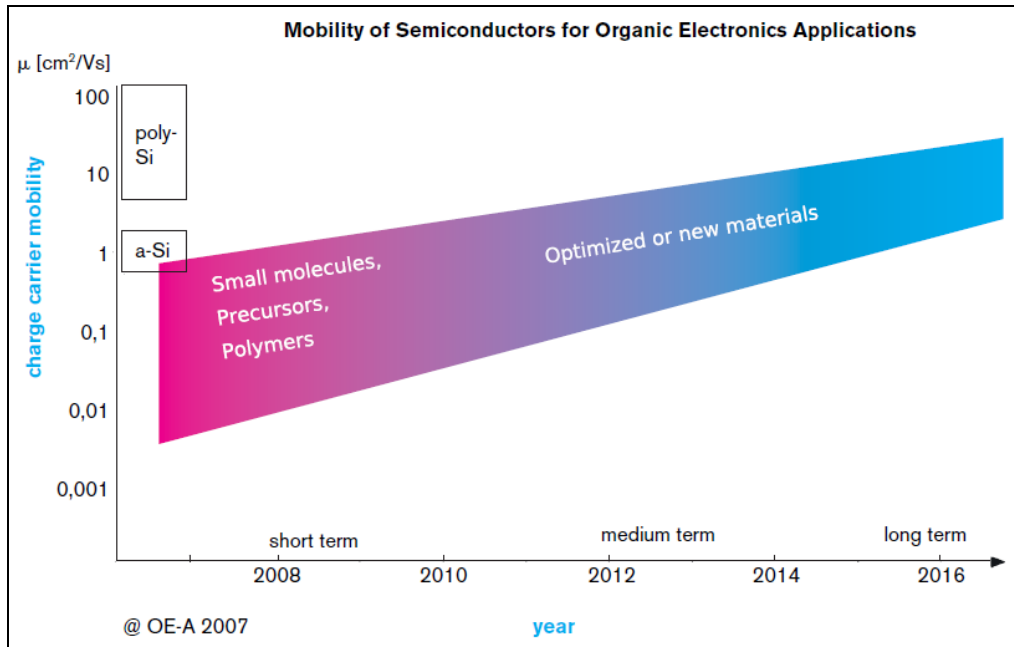


Figura 3.9 Mobilitat dels portadors en semiconductors (OE-A Roadmap 2007) [1]

3.4 Aplicacions i perspectives

Printed electronics permet realitzar una gran varietat de components electrònics: passius (resistències, inductàncies, memòries, etc...), actius (díodes, transistors, **LEDs**, etc...), sensors, indicadors, etc... [1]

Aquests dispositius poden ser econòmicament atractius en aplicacions que requereixen una baixa densitat d'integració, atès que el seu rendiment és relativament pobre.

Dit això, a continuació es descriuran uns exemples d'aplicacions d'aquesta tecnologia:

- **Tags RFID:** el microxip d'una etiqueta **RFID** pot ser substituït per transistors impresos, produint que el preu d'aquests *tags* es redueixi fins a 0.01 \$ o menys. Actualment, les etiquetes **RFID** impreses només constitueixen el 0.8 % del mercat global de **RFID**, però es preveu que a l'any 2017 això s'incrementarà fins al 62.3%. El seu principal inconvenient és que aquesta classe de transistors treballen a baixes freqüències (incompatibles amb la freqüència de treball dels lectors **RFID**) i que la seva vida útil és menor que la dels transistors fabricats amb silici. [2]
No obstant això, gràcies a la seva flexibilitat es poden fer servir en determinades aplicacions on un *tag* **RFID** no és factible d'utilitzar, com s'exposa a la Figura 3.10.

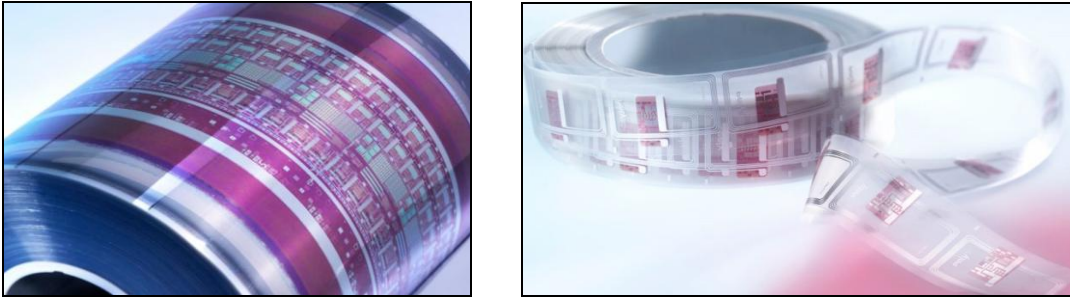


Figura 3.10 Tags RFID impresos [11]

- Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs):** Un **OLED** és un **LED** que posseeix una capa emissora i electroluminiscent realitzada amb una pel·lícula de composts orgànics. Aquesta tecnologia va aparèixer a l'any 1979 i s'estima que avui dia el mercat mundial de productes OLED està valorat en onze mil milions de dòlars. Tradicionalment, els **OLED** basats en transistors de pel·lícula prima tenen alguns defectes com un temps de vida curt o bé un cost energètic major que el d'un **LCD** (a més d'un cost de producció elevat). [2]
 En aquestes circumstàncies, mitjançant les tècniques d'impressió com la **Serigrafia** o la **Injecció de tinta** es poden reduir aquests costos així com implementar *displays* **OLED** amb millors característiques (brillantor, contrast, etc...) que les d'un **LCD**.
- Cèl·lules Fotovoltaiques (PV):** Les cèl·lules fotovoltaiques basades en silici poden generar energia a partir de la llum solar eficientment, però el cost d'utilitzar aquesta tecnologia és bastant elevat ja que el silici ha de ser molt pur (quasi en un 99.99 %). D'aquesta manera, *printed electronics* es planteja com una possible alternativa per a reduir aquests costos, atès que juntament amb la tècnica **R2R** també es possible imprimir cèl·lules **PV** primes i flexibles. [2]
 Gairebé des de finals de l'any 2007, algunes empreses comercialitzen a gran escala cèl·lules **CIGS PV** (*Copper Indium Gallium Selenide*) impreses i amb una potència de fins a 430MW, com es pot observar a la Figura 3.11.

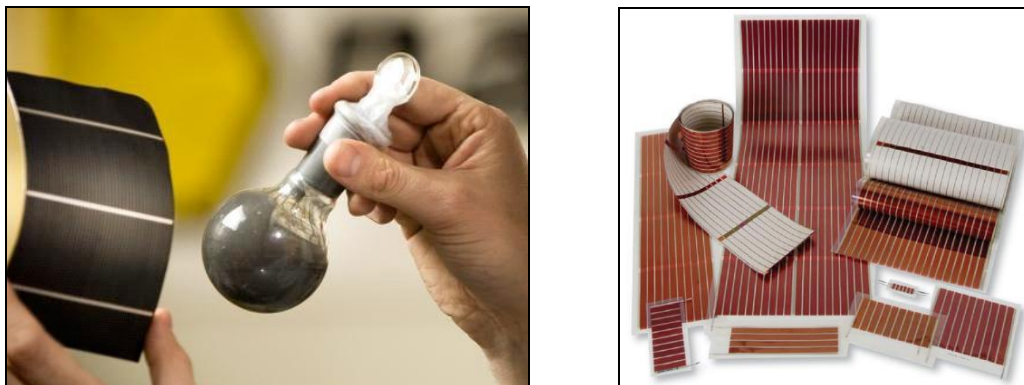


Figura 3.11 Cèl·lules PV impreses [11]

- Paper Electrònic (E-Paper):** El paper electrònic es una tecnologia de visualització creada a l'any 1975 al Japó mitjançant la impressió d'una tinta especial (*electronic ink*) en un substrat flexible per tal d'imitar l'aparença de la tinta ordinària en paper normal. La implementació d'un medi amb característiques similars al paper es realitza amb **TFTs** (*Organic Thin Film Transistor*). [2]
 Algunes de les aplicacions del paper electrònic són els **EPDs** (*e-paper displays*) i els **EPR** (*e-paper readers*). Els seus avantatges són que tenen un alt contrast i que el seu contingut es pot canviar o esborrar.

D'altra banda, és importat destacar que el *IEEE Standards Association* ha publicat dos estàndards (**IEEE 1620-2008** i **IEEE 1620.1-2006**) a fi de regular el procés de prova i manufactura i ampliar així la comercialització de **PE**. [2]

En últim terme, associacions com la **OE-A** o bé la **iNEMI** (*International Electronics Manufacturing Initiative*) han dut a terme iniciatives per tal de preveure el futur desenvolupament del mercat de *printed electronics*.

Alguns d'aquests pronòstics són:

- **PE** s'adoptarà al món industrial i posteriorment a consumidors individuals.
- La tècnica d'**Injecció de tinta** tindrà una forta presència al mercat. [2]
- Es podran realitzar productes basats en **PE** a mida (i de manera particular).
- El mercat de *printed electronics* experimentarà un creixement gradual en la funcionalitat dels dispositius, com es mostra en el *roadmap* de la Figura 3.12.

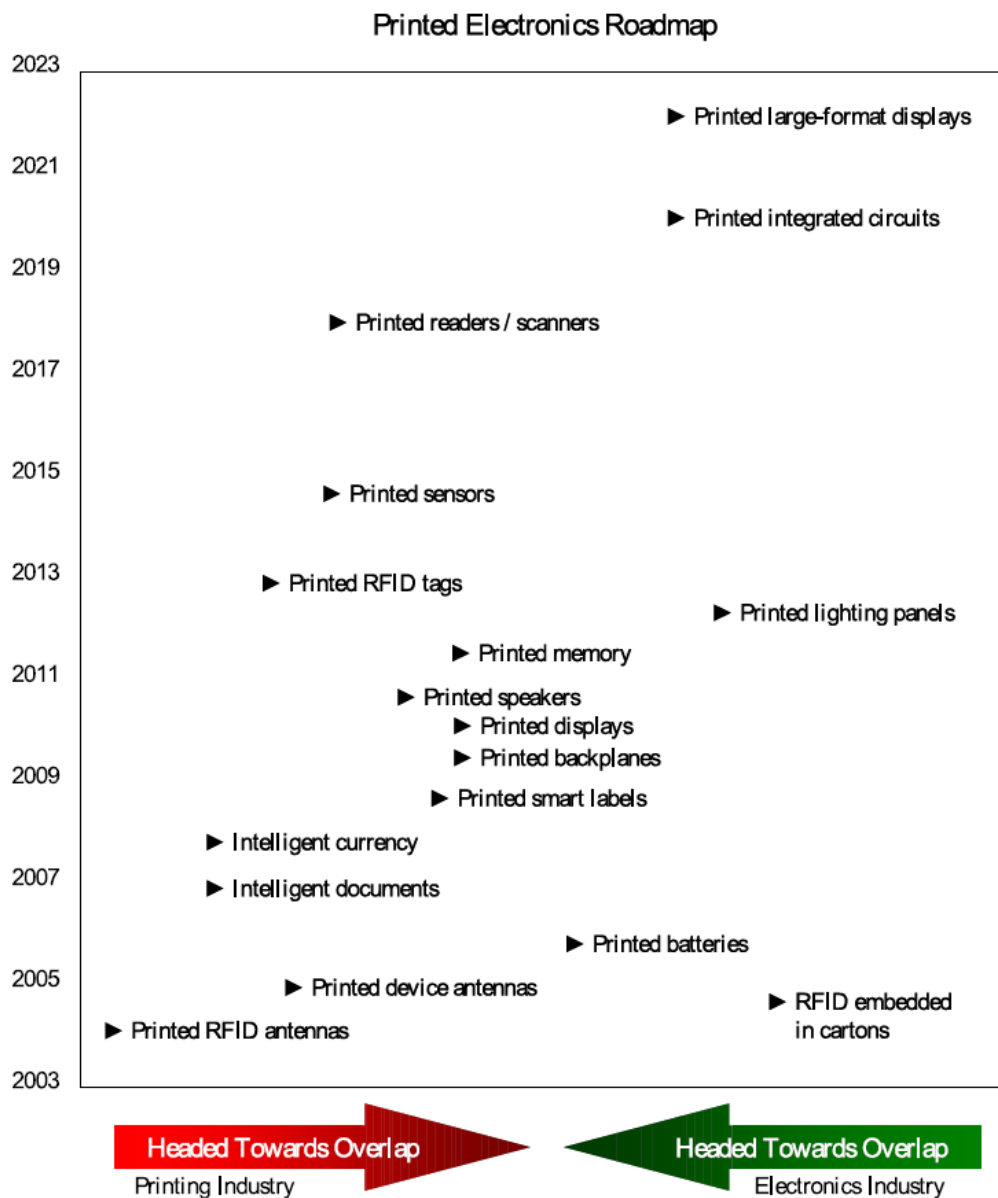


Figura 3.12 Roadmap tecnològic de printed electronics [1]

3.5 Bibliografia

Llibres i pàgines web:

- [1] “*ICT Sector Focus Report: Printed Electronics*”, ObservatoryNANO, 2010.
- [2] Vesa Kantola et al., “*Printed Electronics, Now and Future*”, Bit Bang – Rise to the Future, Helsinki University of Technology (TKK), 2009.
- [3] Bruce E. Kahn, “*Organic Electronics Technology*”, Organic Electronics Association (OE-A) – VDMA Verlag GmbH, 1st edition, 2006.
- [4] V. Subramanian, “*Printed Electronics For Low-Cost Electronic Systems: Technology Status and Application Development*”, IEEE European Solid-State Device Research Conference, pp. 17-24, 2008.
- [5] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/

Imatges i taules:

- [I] Vesa Kantola et al., “*Printed Electronics, Now and Future*”, Bit Bang – Rise to the Future, Helsinki University of Technology (TKK), 2009.
- [II] Daniel, J. H., “*Printed electronics – technologies, challenges and applications*”, International Workshop on Flexible and Printable Electronics, 2010.
- [III] “*ICT Sector Focus Report: Printed Electronics*”, ObservatoryNANO, 2010.
- [IV] Bruce E. Kahn, “*Organic Electronics Technology*”, Organic Electronics Association (OE-A) – VDMA Verlag GmbH, 1st edition, 2006.
- [V] V. Subramanian, “*Printed Electronics For Low-Cost Electronic Systems: Technology Status and Application Development*”, IEEE European Solid-State Device Research Conference, pp. 17-24, 2008.

4. Disseny de Tags RFID per a UHF

En el present capítol es realitzarà el disseny i simulació de dos *tags* **RFID** diferents mitjançant el *software* **ADS** (*Advanced Design System*) a fi d'analitzar el seu rendiment. En ambdós casos s'utilitzaran dues classes de substrats (**Rogers RO3010** i **PET**) amb diverses tintes conductores (plata, etc...) i finalment es compararà el seu rendiment a través de la seva figura de mèrit, és a dir, el seu *read range*.

Així mateix, la descripció i les característiques d'aquestes tintes s'ha afegit als annexes.

4.1 Requisits i procés de disseny

A continuació s'exposaran els principals requisits de disseny que posteriorment s'utilitzaran en els apartats 4.2 i 4.3 per a establir els criteris de selecció de l'antena d'aquests *tags* **RFID**.

- **Rang Freqüencial:** El rang de freqüències de treball depèn de la regulació del país on es vol utilitzar l'etiqueta, com ja s'ha mostrat a l'apartat 2.5 del capítol 2.
- **Mida i forma:** Les dimensions físiques del *tag* han de permetre la seva incorporació en determinats objectes (caixes de cartró, targetes d'identificació, etc...) o bé poder incloure's en etiquetes impreses. [1]
- **Distància de cobertura:** La mínima distància de detecció (*read range*) es determina en funció dels següents factors:
 - **PIRE:** D'acord amb l'apartat 2.5 del capítol 2, la **PIRE** queda especificada per la legislació de cada país.
 - **Objectes:** El rendiment d'un *tag* **RFID** pot canviar quan es col·loca sobre diferents objectes (p. ex. caixes de cartró amb diversos continguts) o bé quan altres objectes estan situats dins de les proximitats de l'objecte amb el *tag*. [1] Per tant, l'antena de l'etiqueta **RFID** es pot dissenyar a fi de tenir un rendiment òptim amb un objecte en particular o per a ser menys sensible al contingut en què es col·loquen.
 - **Orientació:** La distància de lectura depèn de l'orientació de l'antena. Algunes aplicacions requereixen que el *tag* posseeixi un diagrama de radiació específic (omnidireccional, etc...).
- **Aplicacions mòbils:** Les etiquetes **RFID** poden utilitzar-se en certes situacions en què objectes que contenen un *tag* (com palets o caixes) viatgen per una cinta transportadora a velocitats de fins a 16 km/h. En aquest cas, el desplaçament Doppler (*Doppler shift*) és menor a 30 Hz (a 915 MHz) i, per tant, no afecta al funcionament de l'etiqueta. [1] No obstant això, el *tag* passa menys temps dins del rang d'abast del lector **RFID** i, en conseqüència, és necessària una velocitat de lectura elevada.
- **Cost:** El *tag* **RFID** ha de ser un dispositiu de baix cost. Això imposa restriccions tant en l'estructura de l'antena com en l'elecció dels materials utilitzats per a la seva construcció, incloent el microxip **ASIC**. Típicament es fa servir el coure, l'alumini i la tinta de plata com a conductors i els polímers flexibles o els substrats rígids (p. ex. **FR4**) com a dielèctrics, tal com s'ha explicat a l'apartat 3.3 del capítol 3.

- **Fiabilitat:** Aquests *tags* han de ser dispositius capaços d'aguantar variacions degudes a la temperatura o la humitat, així com sobreviure als processos d'inserció o d'impressió.

En segon terme, seguidament s'explicarà el procés de disseny utilitzat als capítols 4 i 5 per a la configuració de les antenes d'aquests *tags* **RFID**.

Un cop s'ha seleccionat una aplicació de **RFID**, es defineixen els requeriments del *tag* a fi d'especificar els materials amb què es construirà la seva antena i s'empaquetarà el seu microxip **ASIC**. Paral·lelament, es determina la impedància d'aquest microxip (p. ex. mesurant-la mitjançant un analitzador de xarxes). [\[1\]](#)

Tot seguit, s'identifica la classe d'antena que s'utilitzarà i es realitza un estudi d'optimització dels seus paràmetres fins que es compleixen els requisits, atès que per exemple la mida i la freqüència de treball de l'antena poden limitar el seu guany o ample de banda màxim.

D'altra banda, les antenes de **RFID** tendeixen a ser massa complicades com per a trobar una solució analítica, així que normalment s'estudien amb eines de modelatge i simulació electromagnètica. D'aquesta manera, dissenys plans s'analitzen mitjançant el mètode **MoM** (*Method of Moments*) i dissenys tridimensionals mitjançant les tècniques **FEM** (*Finite Element Method*) o **FDTD** (*Finite Difference Time Domain Method*).

Arribats a aquest punt, l'antena del *tag* és modelada, simulada i optimitzada mitjançant la monitorització el seu comportament segons les eines d'anàlisi **EM** del *software* seleccionat. Finalment, es fabriquen els prototips de l'etiqueta **RFID** i es mesura el seu rendiment. [\[1\]](#)

En el cas que no s'acomplexin els requeriments del disseny, es realitza novament el procés de simulació i optimització fins que s'aconsegueixin satisfer.

4.2 Configuració d'un Tag RFID (I)

En aquest apartat es dissenyarà un *tag* **RFID** (a partir del model utilitzat a [\[2\]](#)) a la banda **UHF** d'acord amb els següents requisits:

- La freqüència de treball estarà situada enmig de la banda **UHF** (això és, 915 MHz).
- L'antena haurà de ser compacta (p. ex. per tal d'aplicar-se en etiquetes intel·ligents).
- El seu diagrama de radiació haurà de ser omnidireccional al pla perpendicular a l'eix de l'antena (considerant també que en aquest cas **PIRE** = 3.3 W).

Dit això, al subapartat 4.2.1 es realitzarà un estudi teòric de la seva estructura i del seu funcionament i posteriorment al subapartat 4.2.2 s'implementarà i simularà la seva resposta freqüencial.

4.2.1 Anàlisi teòric del model

Com s'ha pogut comprovar al capítol 2, una etiqueta **RFID** està constituïda per una antena i un microxip. Generalment, la impedància del microxip és capacitiva i, per tant, això requereix que la impedància de l'antena sigui inductiva a fi d'obtenir adaptació conjugada.

Tot i que actualment existeixen diverses tècniques d'adaptació conjugada (*Inductively Coupled Loop*, *Nested Slot*, etc... [3]), la gran majoria de tags **RFID** comercials per a **UHF** estan basats en dipòls elèctrics amb alguna variant d'una xarxa d'adaptació en **T** (en anglès, *T-match network*). Segons el model clàssic d'Uda, aquesta configuració pot ser interpretada com una combinació de dos dipòls de fil connectats conjuntament i analitzada a partir de les components radiatives (*antenna mode*) i no radiatives (*transmission line mode*) de l'antena. [4]

A la Figura 4.1 es mostra aquesta estructura, així com el seu model circuital equivalent.

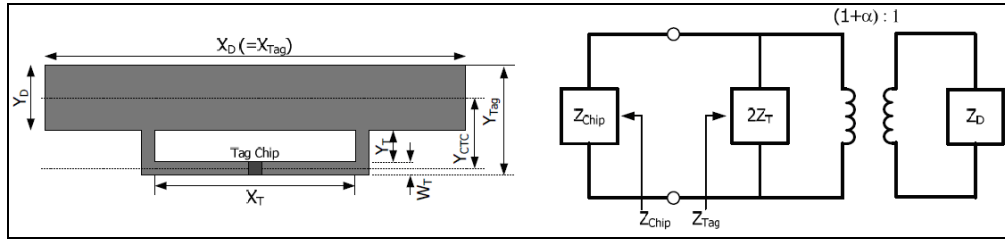


Figura 4.1 Tag RFID (dipòl amb xarxa d'adaptació en T i circuit equivalent) [II]

No obstant això, atès que aquesta xarxa d'adaptació és elèctricament petita en el rang freqüencial de **UHF**, també es pot aproximar aquesta configuració a partir d'un model circuital d'elements concentrats [5]. D'aquesta manera, això permet transformar l'actual disseny en un filtre passa-banda de dues etapes.

En aquestes circumstàncies, la impedància del microxip **ASIC** es pot modelar com una resistència i una capacitat col·locades en paral·lel o bé en sèrie, la xarxa d'adaptació com una combinació d'inductàncies en sèrie i derivació i la impedància del dipòl com un circuit **RLC** sèrie, com s'il·lustra a la Figura 4.2. [6]

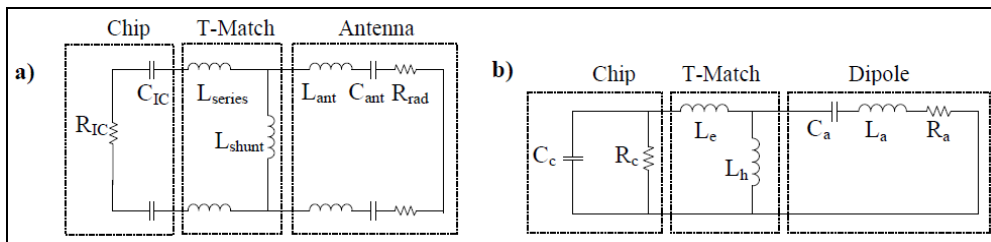


Figura 4.2 Model circuital: versió balancejada (a) i desbalancejada (b) [III]

Així mateix, gràcies a la simetria d'aquest tipus de geometria i a l'excitació en mode diferencial del microxip [7], es pot aplicar també el concepte de paret elèctrica (*even-odd mode analysis*) a fi d'obtenir el circuit equivalent de la Figura 4.3.

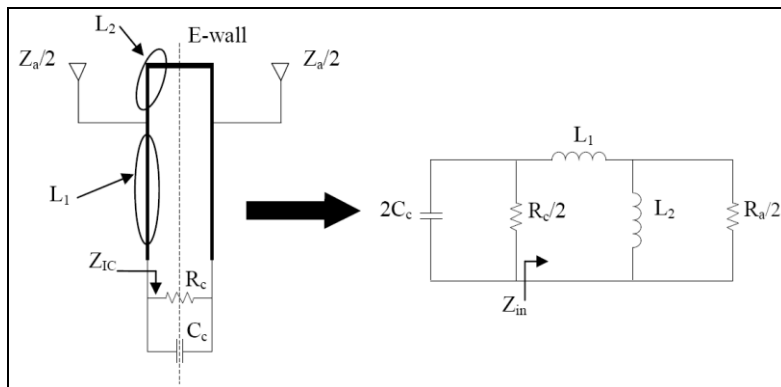


Figura 4.3 Model circuital del tag RFID amb pla de simetria [III]

La impedància de l'antena s'assumeix que és resistiva pura a la freqüència de treball, fet que força a treballar amb una antena ressonat [2]. Anàlogament, també es pot observar que la xarxa d'adaptació es pot reformular com un autotransformador, obtenint així l'aproximació de la Figura 4.4.

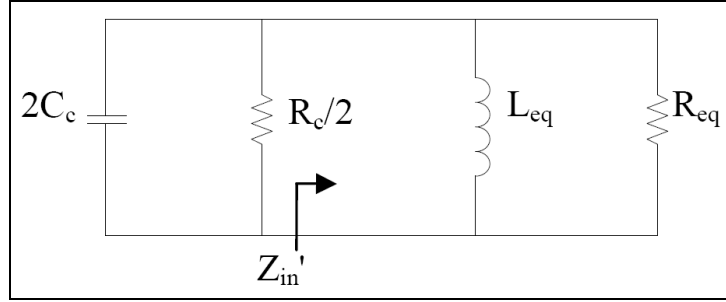


Figura 4.4 Model circuital del tag RFID (aproximació) [III]

On el valor de L_{eq} i R_{eq} es podrà expressar (d'acord amb [2]) com:

$$R_{eq} \approx \left(1 + \frac{L_1}{L_2}\right)^2 \frac{R_a}{2} \quad (1)$$

$$L_{eq} \approx L_1 + L_2 \quad (2)$$

De la mateixa manera, per tal d'aconseguir adaptació conjugada a aquesta freqüència d'operació, s'haurà de complir que $R_{eq} = R_c/2$ i $L_{eq} = 1/(2\omega_0^2 C_c)$.

4.2.2 Simulació del prototip

En primer terme, determinarem les diferents característiques dels substrats i de les tintes conductores, així com el microxip i la geometria de l'antena que farem servir. És a dir:

- **Substrats:** Utilitzarem un substrat **Rogers RO3010** ($\epsilon_r = 10.2$, $\tan\delta = 0.0023$ i $h = 10$ mil) i un substrat flexible **PET** ($\epsilon_r = 3.3$, $\tan\delta = 0.015$ i $h = 5$ mil). [2]
- **Conductors:** Degut al seu cost, utilitzarem una làmina de coure ($\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ S/m) i tintes conductores de plata i coure ($\sigma = 1.075 \cdot 10^6$ S/m) i de plata ($\sigma = 3.45 \cdot 10^6$ S/m).
- **Antena:** D'acord amb els anteriors requeriments, l'antena que s'ha considerat per a la implementació d'aquest tag **RFID** serà un dipol doblegat i serpentejat. [2]
- **ASIC:** En aquest cas s'ha escollit el circuit integrat **NXP UCODE G2XM** ($Z_{IC}(f_0) = 16 - j148 \Omega$ i $P_{min} = -15$ dBm). [8]

A fi de sintetitzar la xarxa d'adaptació en **T**, inicialment es crearà un llaç tancat format per una tira conductora estreta connectada a un port diferencial amb impedància $Z_{IC}(f_0)$. Aleshores, mitjançant el *software ADS* introduïrem les característiques del substrat **Rogers RO3010** (*Substrate* \rightarrow *Create/Modify*) i especificarem les propietats d'aquests ports (*Ports* \rightarrow *Editor*).

D'acord amb la Figura 4.3 i 4.4, aquesta xarxa d'adaptació presentarà un comportament inductiu i, per tal d'aconseguir que la seva reactància sigui de 148Ω , realitzarem un escombrat de la longitud del llaç. Això és: al *Layout Window* del nostre disseny, posarem en funció de dues variables (*Component* \rightarrow *Parameters*) la longitud dels segments L_1 i L_2 i exportarem aquest model (*Component* \rightarrow *Create/Update*) en el *Schematic Window*.

Tot seguit, mitjançant l'opció *Parameter Sweep* (o bé amb l'eina *Single Optimization*), realitzarem diferents simulacions electromagnètiques de la seva resposta freqüencial en funció dels valors d'aquestes longituds, obtenint així el resultat de la Figura 4.5.

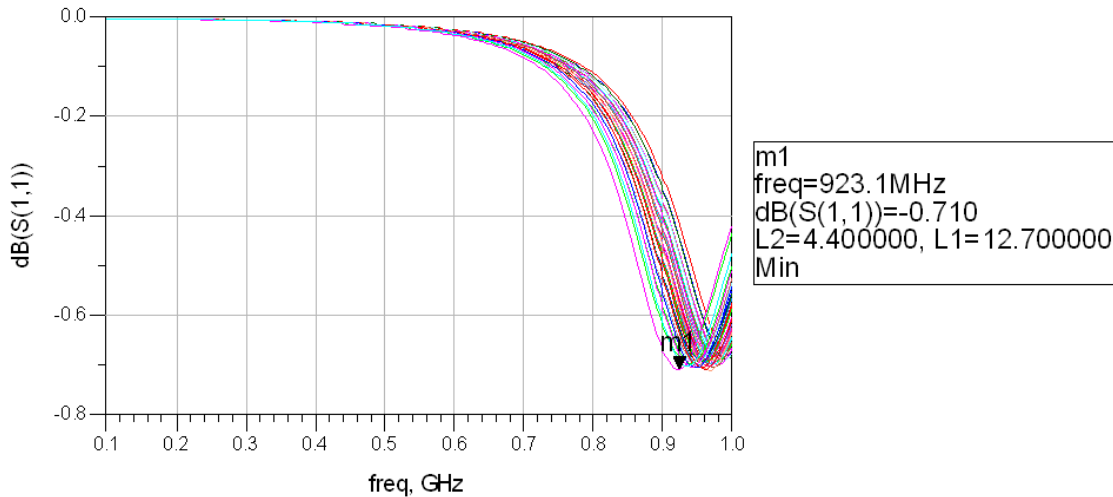


Figura 4.5 Paràmetre S_{11} (mòdul) en funció de les longituds L_1 i L_2 (mm)

Com es pot apreciar al *marker m1* de la Figura 4.5, la longitud total d'aquest llaç tancat serà, per tant, d'aproximadament 30 mm.

D'altra banda, d'acord amb la Figura 4.3, la posició on es connectarà l'antena a la xarxa d'adaptació determinarà la raó entre les inductàncies L_1 i L_2 , així que també realitzarem un escombrat d'aquesta posició fins a obtenir adaptació conjugada a la freqüència de treball, com es pot comprovar a la Figura 4.6.

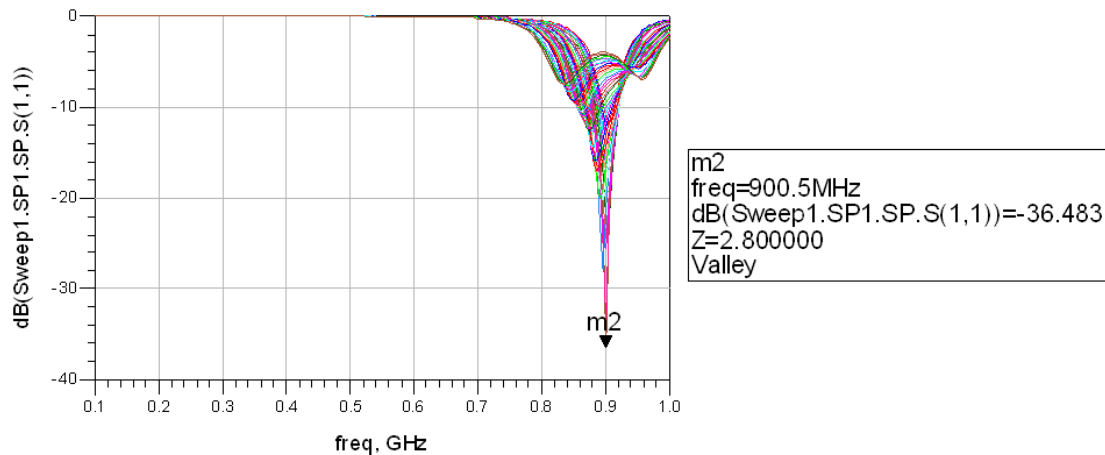


Figura 4.6 Paràmetre S_{11} (mòdul) en funció de la posició de connexió de l'antena

On la variable Z (mm) representa la distància entre el punt de connexió de l'antena i l'extrem superior del llaç tancat (L_2) de la Figura 4.3.

Finalment, a partir dels valors obtinguts a la Figura 4.5 i 4.6, implementarem el nostre *tag RFID* i mitjançant l'eina *Scale/Oversize* ajustarem les dimensions d'aquest disseny a la freqüència d'operació, com es pot observar a la Figura 4.7.

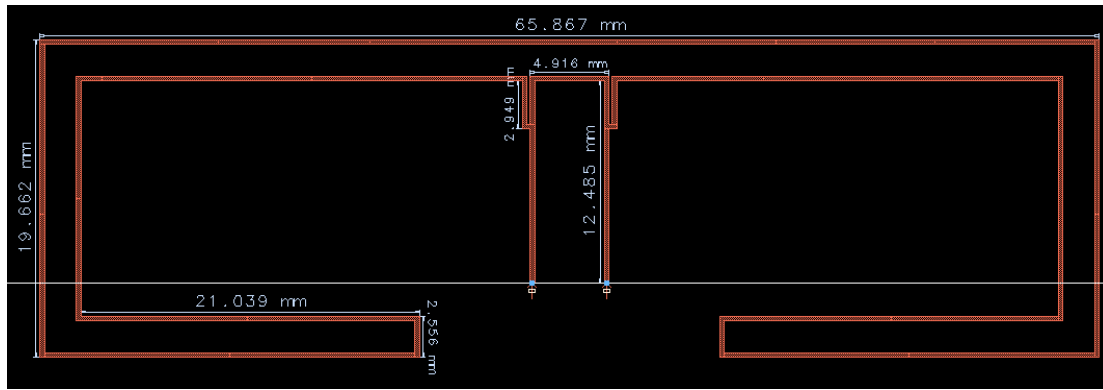


Figura 4.7 Layout d'una etiqueta RFID amb Rogers RO3010

Les dimensions d'aquest *tag* seran, per tant, d'aproximadament $0.2\lambda \times 0.06\lambda$, essent λ la longitud d'ona al buit a 915 MHz.

A continuació, per tal de verificar el comportament de l'estructura, també representarem la seva distribució de corrent mitjançant l'opció *Post-Processing* → *Visualization*, tal com s'il·lustra a la Figura 4.8.

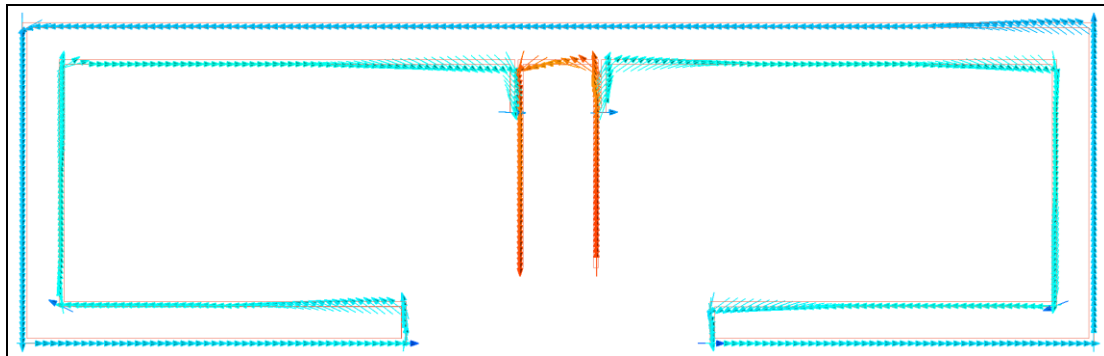


Figura 4.8 Representació de la densitat de corrent (en escala logarítmica) I

Com es pot apreciar, a la freqüència de treball es produeix la superposició del primer i del segon mode de ressonància de l'antena i els segments verticals adjacents tenen fases pràcticament oposades. Per tant, es produeix una cancel·lació parcial dels seus corrents i, en conseqüència, poden radiar (però tanmateix també s'hi originen pèrdues).

D'altra banda, els segments horitzontals controlen la resistència de radiació mentre que la longitud total de l'antena afecta al valor de la seva inductància. [3]

Paral·lelament, a partir de l'eina *Post-Processing* → *Radiation Pattern*, realitzarem una representació bidimensional dels plans **E** i **H** del diagrama de radiació d'aquesta configuració a 915 MHz. Com es pot comprovar a la Figura 4.9, compleix amb els requisits exposats al inici de l'apartat 4.2.

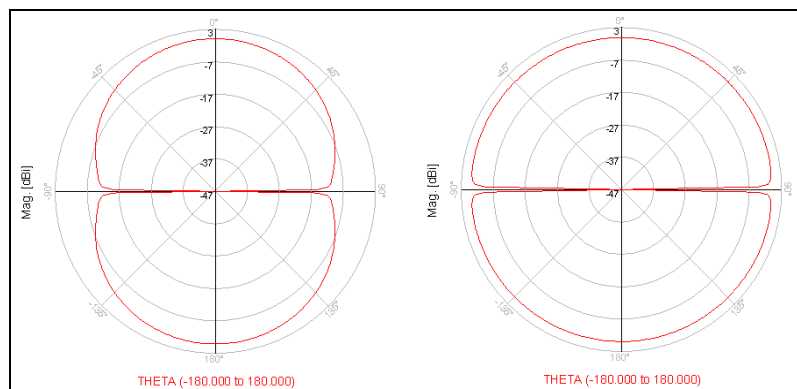
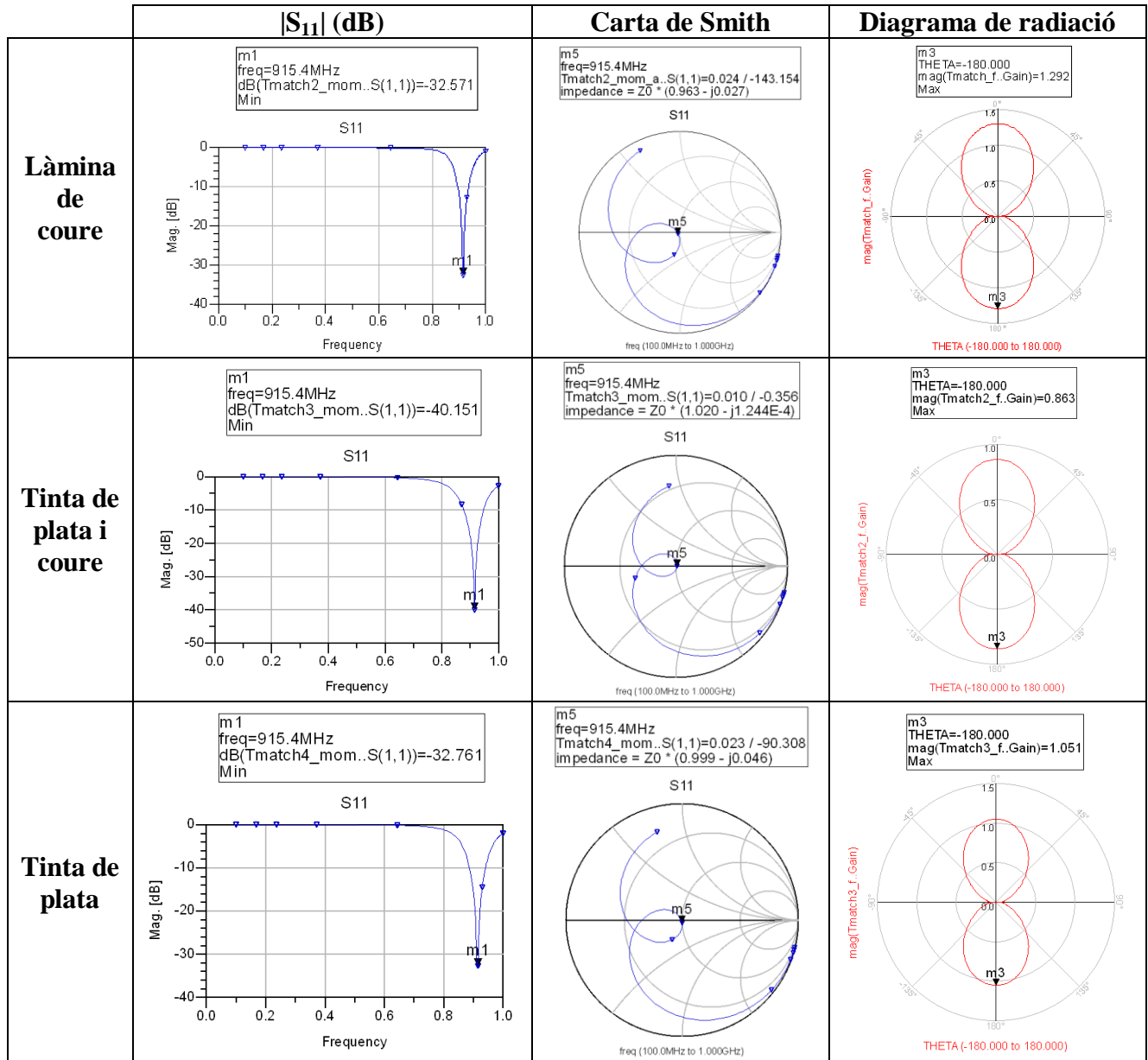


Figura 4.9 Pla E (dreta) i pla H (esquerra) del diagrama de radiació I

Conforme amb tot això, mitjançant la funció *Simulation* → *S-parameters (Momentum Microwave)* realitzarem un simulació electromagnètica del nostre model en funció de la conductivitat de les diferents tintes i un substrat **Rogers RO3010**, com es mostra a la Taula 4.1.



Taula 4.1 Resposta freqüencial del tag RFID (Rogers RO3010) I

Com es pot observar, l'adaptació conjugada succeeix a la nostra freqüència de disseny (a excepció d'un petit desplaçament de 400 KHz). Això implica que, a 915 MHz, el paràmetre S_{11} mostra un màxim de retard de grup.

Arribats a aquest punt, canviarem el substrat utilitzat per un substrat **PET** i repetirem un altre cop aquest procés de disseny i simulació, obtenint així el disseny de la Figura 4.10.

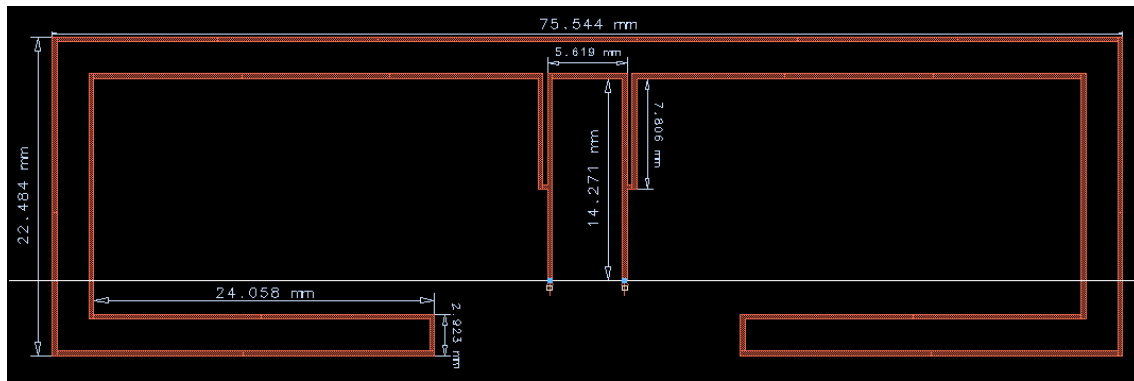
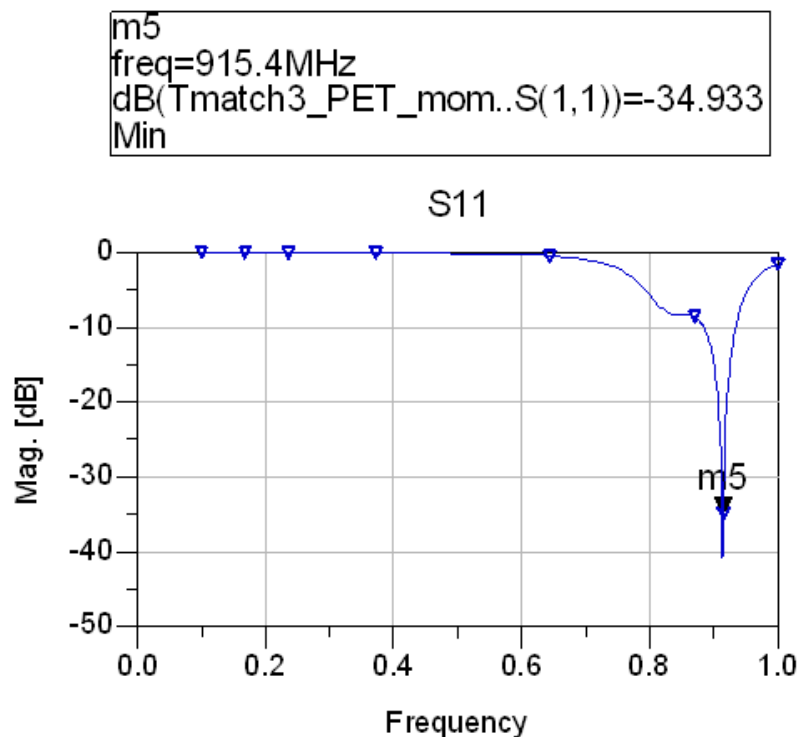


Figura 4.10 Layout d'una etiqueta RFID amb PET I

No obstant això, si ara realitzem una simulació electromagnètica d'aquesta estructura (per exemple amb una tinta conductora de plata i coure), obtindrem el resultat de la Figura 4.11

Figura 4.11 Paràmetre S_{11} (mòdul) del tag RFID de la Figura 4.10

i, com es pot apreciar, l'ample de banda en què el coeficient de reflexió és menor aproximadament a -10 dB s'ha incrementat i han aparegut dos mínims de reflexió. D'acord amb el criteri de **Bode-Fano** [2], això és degut a la reducció de les pèrdues de retorn a la freqüència de ressonància al modificar la posició on l'antena es connecta amb la xarxa d'adaptació (ja que es modifica la seva longitud i, en conseqüència, la seva impedància).

Tot i que això és d'especial interès a **RFID** al permetre augmentar l'ample de banda de detecció sense degradar molt significativament l'abast màxim, en aquest cas es desitja realitzar un tag **RFID** a una única freqüència de **UHF**.

Per tant, dissenyarem novament la xarxa d'adaptació i determinarem la posició idònia on connectar l'antena segons l'anterior procediment, com es mostra a la Figura 4.12 i 4.13.

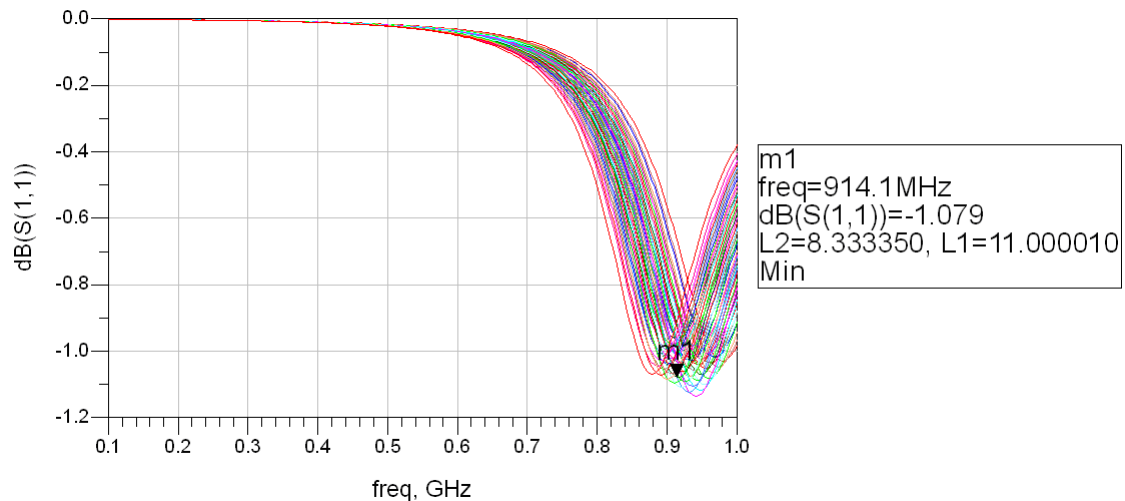


Figura 4.12 Paràmetre $|S_{11}|$ (dB) en funció de les longituds L_1 i L_2 (mm)

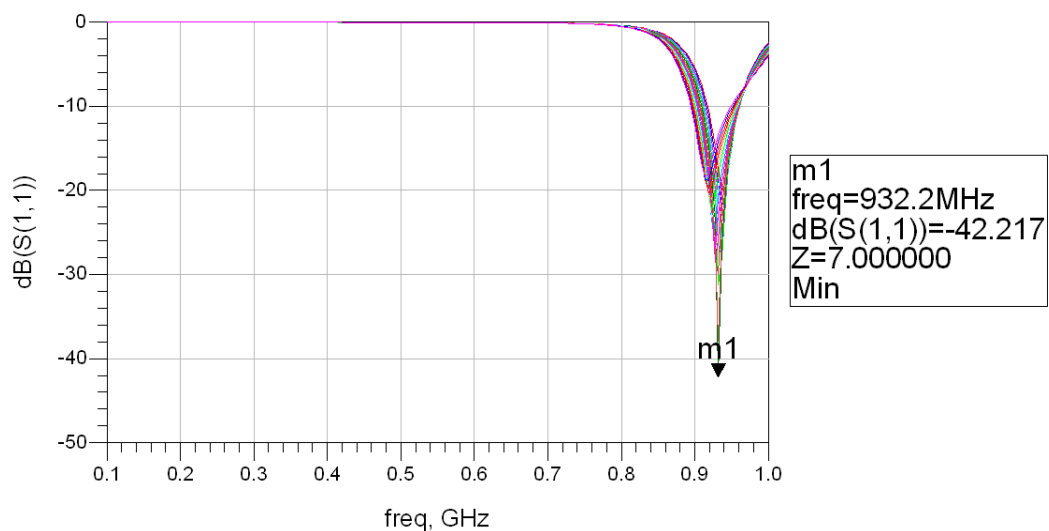


Figura 4.13 Paràmetre $|S_{11}|$ (dB) en funció de la posició de connexió de l'antena

En últim terme, a partir dels resultats obtinguts a la Figura 4.12 i 4.13, configurarem la nostra etiqueta **RFID** i simularem la seva resposta freqüencial en funció de la conductivitat de les diverses tintes i per a un substrat **PET**, com es pot observar a la Figura 4.14 i a la Taula 4.2.

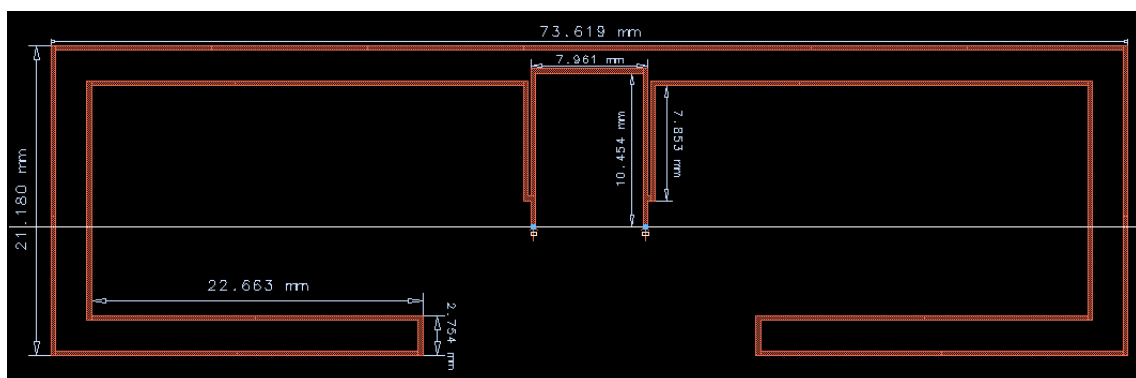
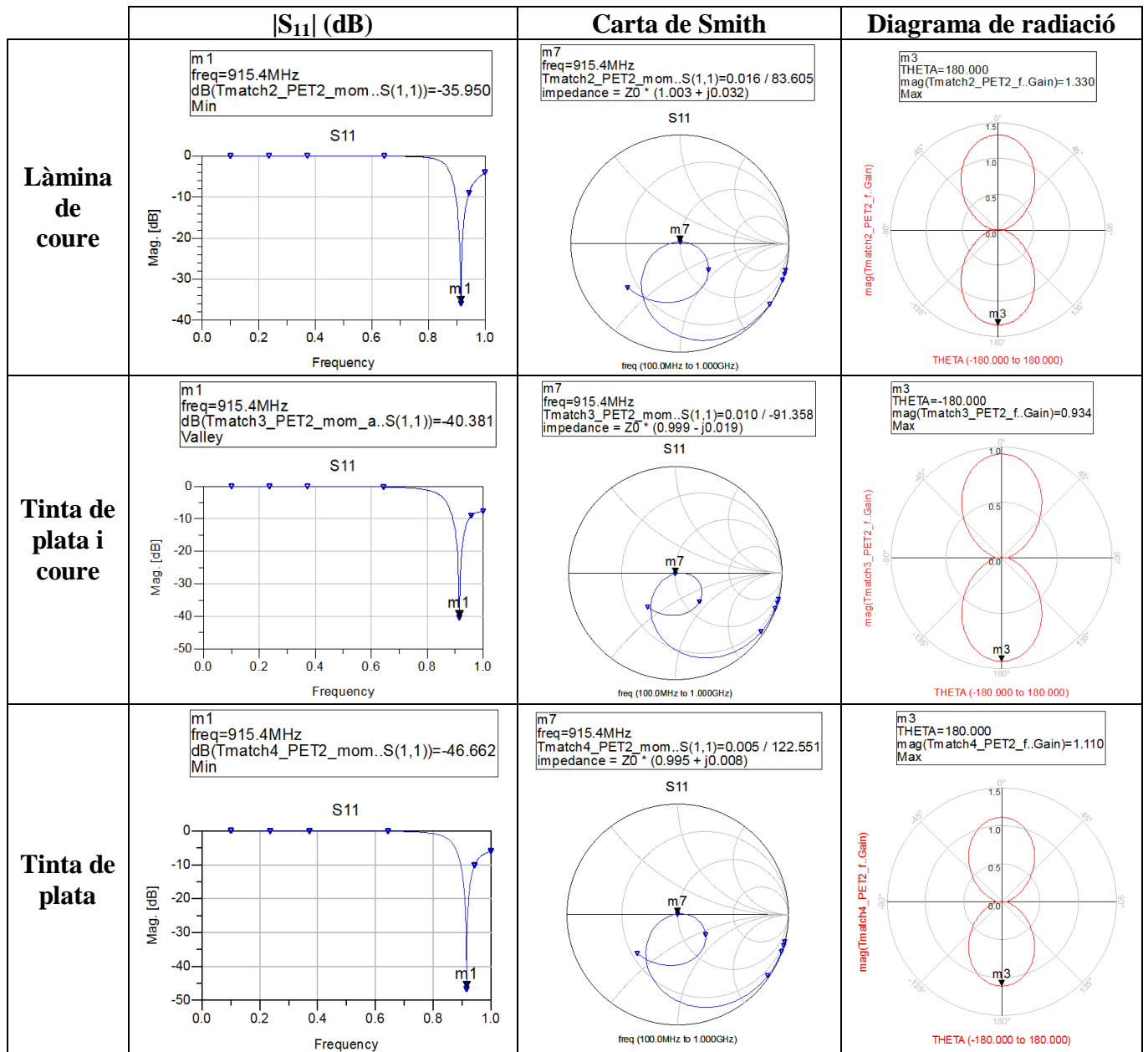


Figura 4.14 Layout d'una etiqueta RFID amb PET II

En aquest cas, les dimensions d'aquest tag seran d'aproximadament $0.225\lambda \times 0.0646\lambda$.



Taula 4.2 Resposta freqüencial del tag RFID (PET) I

4.3 Configuració d'un Tag RFID (II)

Seguidament s'efectuarà una segona configuració d'una etiqueta **RFID** (a partir del model utilitzat a [\[9\]](#)) d'acord amb els requeriments exposats anteriorment a l'apartat 4.2.

De la mateixa manera, al subapartat 4.3.1 s'estudiarà teòricament aquesta estructura i al subapartat 4.3.2 es realitzarà i simularà electromagnèticament la seva resposta en freqüència.

4.3.1 Anàlisi teòric del model

A la literatura existeixen diverses tècniques d'adaptació conjugada mitjançant xarxes d'adaptació. No obstant això, en alguns casos els problemes relacionats amb el cost o bé les seves mides forcen l'omissió de xarxes externes i, per tant, és necessària una adaptació directa entre el microxip i l'antena.

Així mateix, el valor de la impedància del microxip depèn de la freqüència utilitzada i això dificulta l'obtenció d'un major ample de banda d'adaptació amb o bé sense xarxes d'adaptació. [9]

Per aquest motiu, considerant el diagrama de blocs de la Figura 4.15, s'emprarà una xarxa d'adaptació passiva amb un ample de banda més ampli i centrada a la freqüència de 915 MHz.

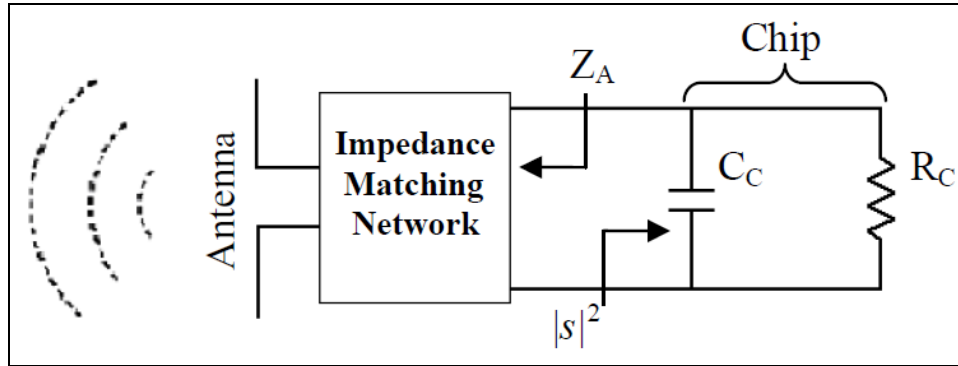


Figura 4.15 Esquemàtic d'una etiqueta RFID (cas general) [III]

Atès que de forma genèrica la impedància d'entrada Z_A de la xarxa d'adaptació pot modelar-se a partir d'una susceptància B_A i una conductància G_A situades en paral·lel, expressarem el coeficient de reflexió de potència segons l'equació 3.

$$|S_{11}|^2 = \left| \frac{Z_{\text{Chip}} - Z_A^*}{Z_{\text{Chip}} + Z_A} \right|^2 = \frac{(G_A - G_{\text{Chip}})^2 + (B_A + B_{\text{Chip}})^2}{(G_A + G_{\text{Chip}})^2 + (B_A + B_{\text{Chip}})^2} \quad (3)$$

On G_{Chip} i B_{Chip} és la conductància i susceptància del microxip.

A fi de configurar aquesta xarxa d'adaptació, en primer terme haurem de determinar el valor de G_A que minimitza el coeficient de reflexió al voltant de la freqüència on es produeix l'adaptació conjugada.

Com es descriu a [9], si expressem l'augment del coeficient de reflexió entorn d'aquesta freqüència mitjançant una expansió de **Taylor** de segon ordre de l'equació (3), es pot demostrar que G_A ha de ser igual a G_{Chip} i que aquesta conductància pot aproximar-se simplement mitjançant una resistència.

D'altra banda, com que el valor absolut de la susceptància de l'admitància d'entrada (això és, $B_A + B_{\text{Chip}}$) augmenta quan ens allunyem de la freqüència de ressonància (complint el teorema de **Foster**), això produeix una degradació inevitable del coeficient de reflexió de potència. [9]

En aquestes circumstàncies, per tal d'optimitzar l'ample de banda haurem de minimitzar la derivada d'aquesta susceptància respecte de la freqüència. Anàlogament, també haurem de tenir present que la màxima transferència de potència s'assoleix amb un valor negatiu de B_A .

Per tant, com s'exposa a [9], l'antena que proporciona una reactància positiva a una determinada freqüència i minimitza la derivada d'aquesta reactància és simplement una inductància de valor $L = 1/(2\omega_0^2 C_C)$. D'aquesta manera, obtindrem un circuit equivalent similar al de la Figura 4.4 del subapartat 4.2.1, com s'il·lustra a la Figura 4.16.

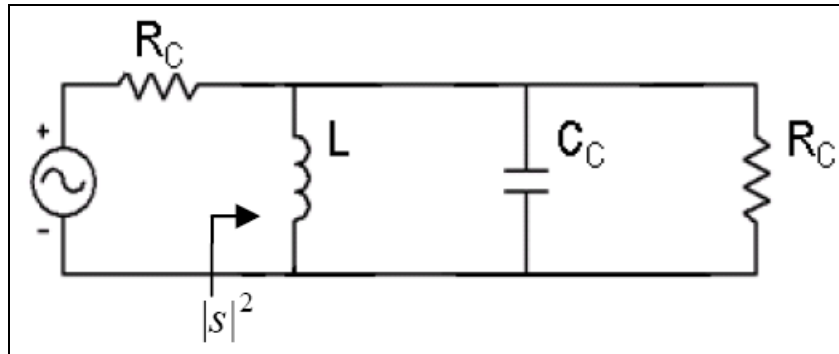


Figura 4.16 Circuit equivalent d'un tag RFID per a UHF [III]

4.3.2 Simulació del prototip

En aquest cas, les característiques dels substrats i de les tintes conductores així com el microxip utilitzat són idèntiques a les del subapartat 4.2.2, mentre que l'antena seleccionada és un dipol doblegat asimètric perquè s'ajusta al model **RL** paral·lel de la Figura 4.17.

En primer terme, a fi de validar l'equivalent circuital del tag **RFID** de la Figura 4.16, implementarem aquest model en el *Schematic Window* del *software ADS*, com es pot comprovar a la Figura 4.17.

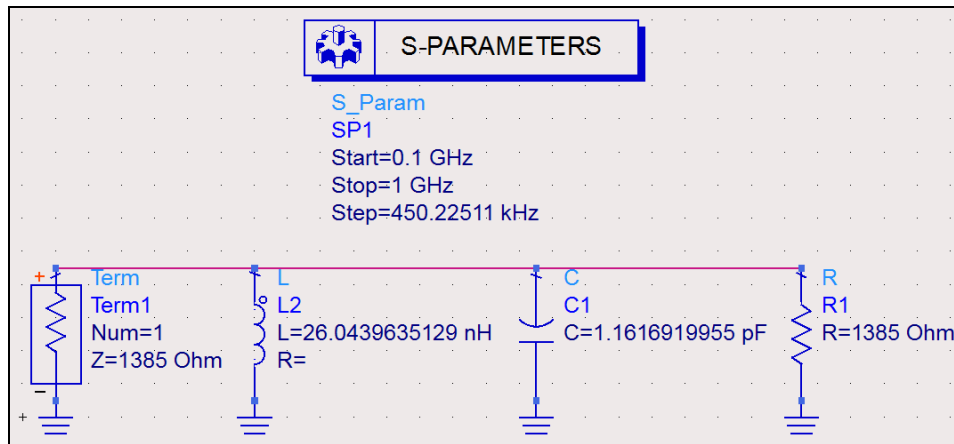


Figura 4.17 Model circuital d'elements concentrats d'un tag RFID

On el valor de C_C i R_C es podrà expressar a partir de la impedància $Z_{IC}(f_0)$ com:

$$R_C = \frac{R_{IC}^2 + X_{IC}^2}{R_{IC}} \quad (4)$$

$$C_C = \frac{X_{IC}}{\omega_0 (R_{IC}^2 + X_{IC}^2)} \quad (5)$$

Aleshores, realitzarem una simulació electromagnètica de la seva resposta freqüencial i, com es pot apreciar a la Figura 4.18, l'adaptació conjugada es produeix a la freqüència d'operació d'aquesta l'etiqueta.

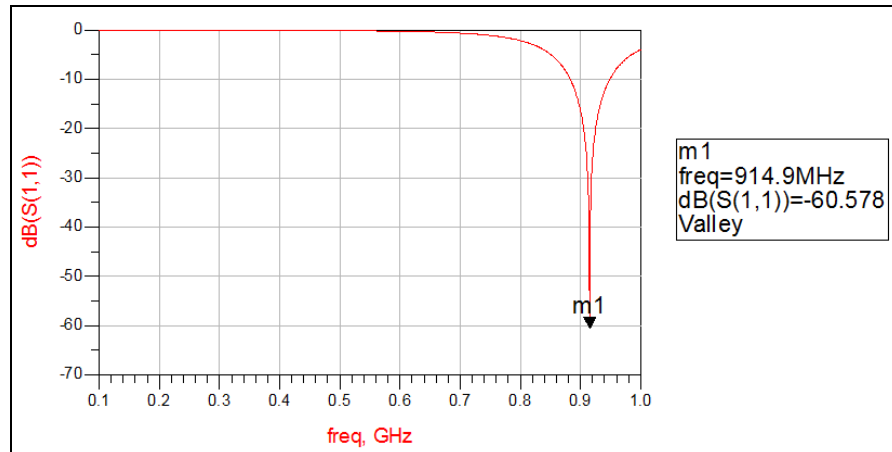


Figura 4.18 Paràmetre S_{11} (mòdul) del tag RFID de la Figura 4.17

A continuació, a partir del model i les dimensions físiques de l'antena presents a [7] i [9], dissenyarem i ajustarem (amb la funció *Scale/Oversize*) el nostre tag **RFID**, com es mostra a la Figura 4.19.

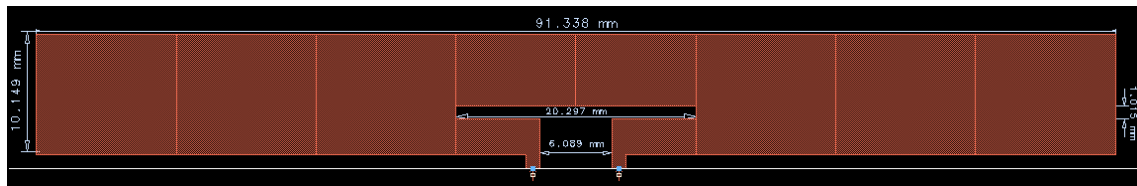


Figura 4.19 Layout d'un tag RFID amb Rogers RO3010

Les dimensions d'aquest *tag* seran, per tant, d'aproximadament $0.279\lambda \times 0.031\lambda$, essent λ la longitud d'ona al buit a 915 MHz.

D'altra banda, per tal de comprovar el comportament de l'estructura, representarem la seva distribució de corrent i realitzarem una representació bidimensional dels plans **E** i **H** del seu diagrama de radiació, obtenint així el resultat de la Figura 4.20 i 4.21.

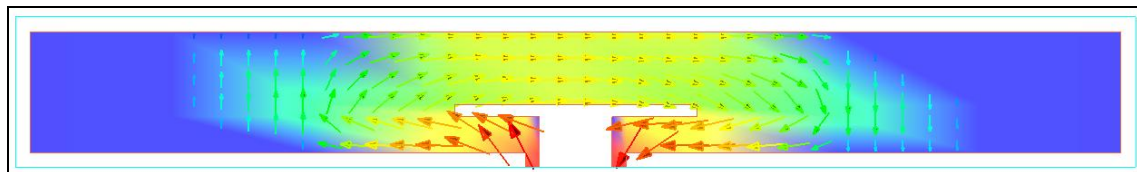


Figura 4.20 Representació de la densitat de corrent (en escala logarítmica) II

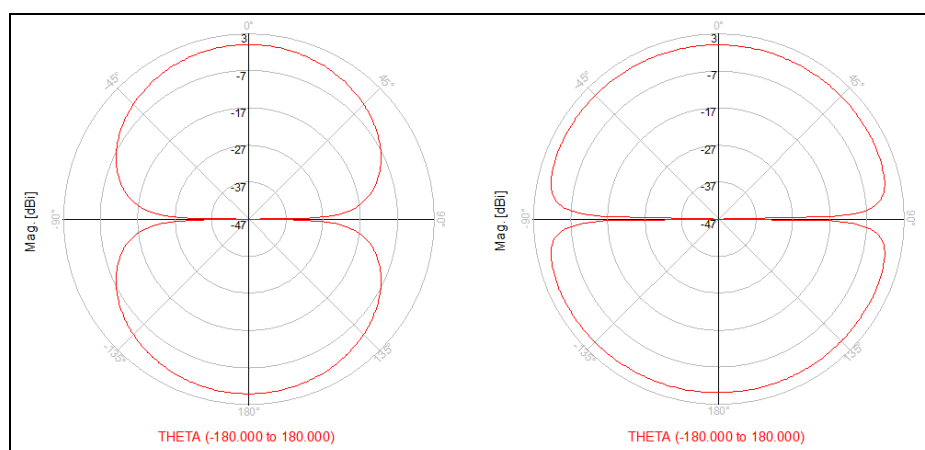
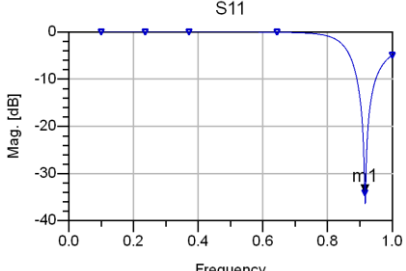
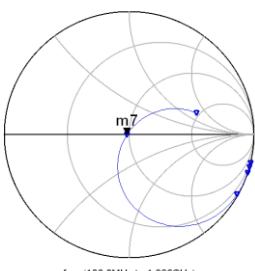
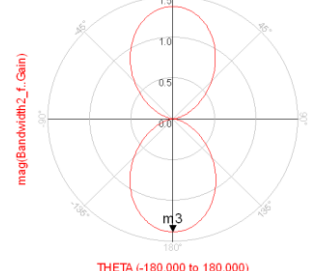
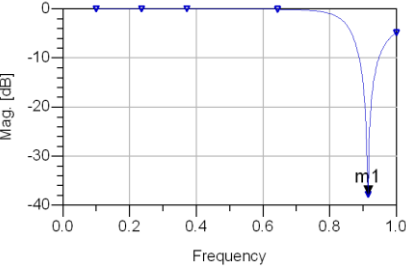
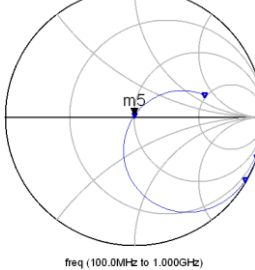
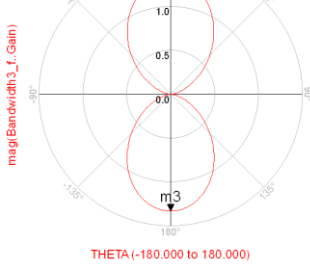
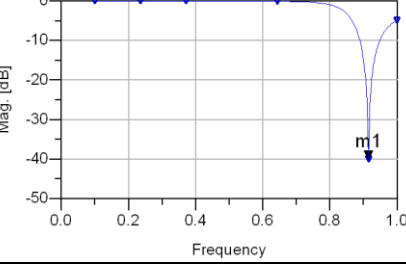
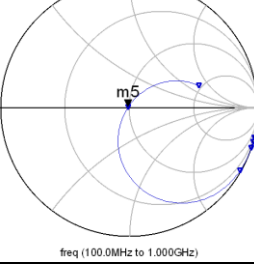
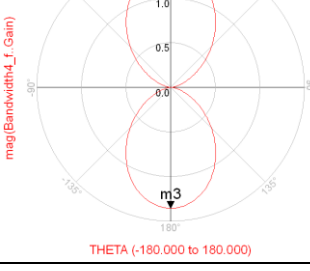


Figura 4.21 Pla E (dreta) i pla H (esquerra) del diagrama de radiació II

Com es pot observar a la Figura 4.20, les reduïdes dimensions de l'antena forcen que la direcció de la seva densitat de corrent sigui diferent en ambdós braços. Encara que, conforme amb la Figura 4.8, la direcció de la densitat de corrent en un dipol doblegat ha de ser la mateixa en els dos braços (*antenna mode*), aquest disseny asimètric pot millorar substancialment la seva eficiència de radiació. [9]

En relació amb la Figura 4.21, també es pot comprovar que compleix igualment amb els requeriments exposats inicialment a l'apartat 4.3.

D'acord amb aquests resultats, simularem la seva resposta freqüencial d'aquest model en funció de la conductivitat de les diferents tintes i un substrat **Rogers RO3010**, com s'il·lustra a la Taula 4.3.

	$ S_{11} $ (dB)	Carta de Smith	Diagrama de radiació
Làmina de coure	<p>m1 freq=915.4MHz dB(Bandwidth2_mom..S(1,1))=-34.113 Min</p> 	<p>m7 freq=915.4MHz Bandwidth2_mom..S(1,1)=0.020 / -171.860 impedance = Z0 * (0.962 - j0.005)</p> 	<p>m3 THETA=-180.000 mag(Bandwidth2_f..Gain)=1.381 Max</p> 
Tinta de plata i coure	<p>m1 freq=915.4MHz dB(Bandwidth3_mom..S(1,1))=-37.821 Min</p> 	<p>m5 freq=915.4MHz Bandwidth3_mom..S(1,1)=0.013 / 80.903 impedance = Z0 * (1.004 + j0.025)</p> 	<p>m3 THETA=-180.000 mag(Bandwidth3_f..Gain)=1.330 Max</p> 
Tinta de plata	<p>m1 freq=915.4MHz dB(Bandwidth4_mom..S(1,1))=-40.050 Min</p> 	<p>m5 freq=915.4MHz Bandwidth4_mom..S(1,1)=0.010 / 147.404 impedance = Z0 * (0.983 + j0.011)</p> 	<p>m3 THETA=-180.000 mag(Bandwidth4_f..Gain)=1.354 Max</p> 

Taula 4.3 Resposta freqüencial del tag RFID (Rogers RO3010) II

Anàlogament a la Taula 4.1 del subapartat 4.2.2., la màxima transferència de potència es produeix aproximadament enmig de la banda **UHF**. No obstant això, en aquest cas el guany màxim és lleugerament major.

Paral·lelament, també calcularem i compararem la impedància d'entrada de l'antena del tag de la Figura 4.19 i la impedància del model circuital **RL** paral·lel de la Figura 4.17 a partir de les equacions 6 i 7, respectivament.

$$Z_{IN}|_A = \frac{R_C \cdot j\omega L}{R_C + j\omega L} \quad (6)$$

$$Z_{IN}|_B = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (7)$$

Dit això, introduïrem les expressions 6 i 7 en el *Data Display Window* mitjançant l'opció *Equation* i representarem el valor d'aquesta impedància considerant pel cas de $Z_{IN}|_B$ una làmina de coure, tal com s'exposa a la Figura 4.22.

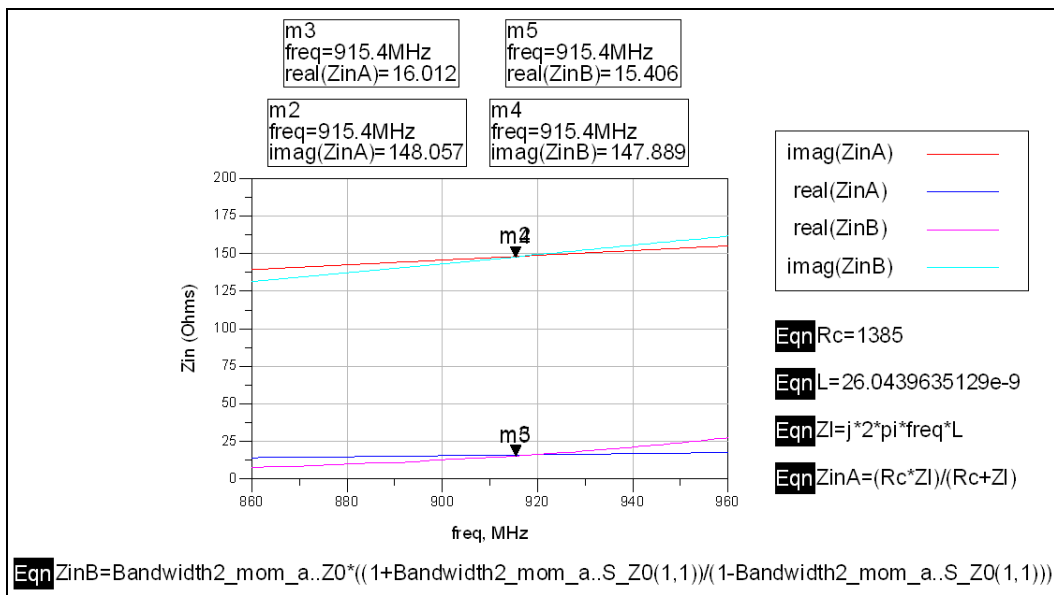


Figura 4.22 Impedància d'entrada d'un tag RFID a la banda de UHF

Els *markers* **m₃** i **m₅** indiquen la magnitud de la resistència de les equacions 6 i 7, respectivament, mentre que els *markers* **m₂** i **m₄** mostren les seves corresponents reactàncies a 915 MHz. Com es pot apreciar, en ambdós casos el valor de la impedància d'entrada és pràcticament idèntic a $Z_{IC}(f_0) = 16 - j148 \Omega$.

Per tant, a la banda freqüencial de **UHF**, l'equivalent circuital de la Figura 4.17 és una bona aproximació de la impedància d'aquest tag.

En últim terme, substituïrem el substrat utilitzat per un substrat **PET** i repetirem un altre cop aquest procés de disseny i simulació, obtenint així l'estructura de la Figura 4.23 i la resposta freqüencial de la Taula 4.4.

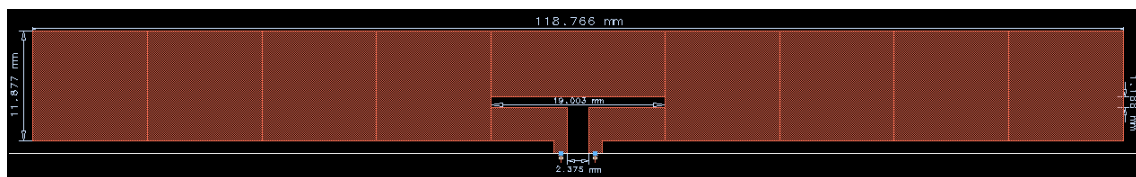
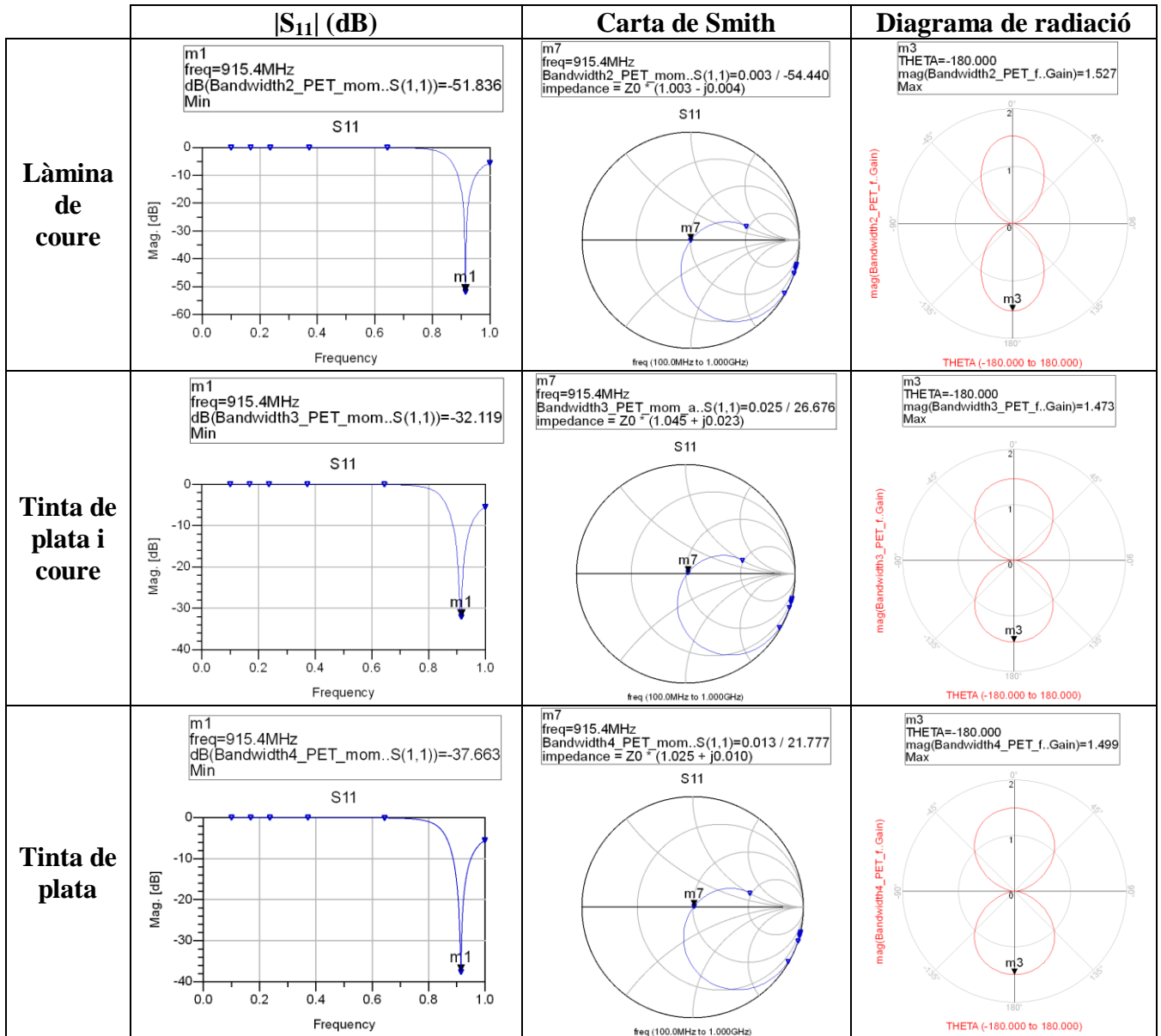


Figura 4.23 Layout d'un tag RFID amb PET

En aquest cas, les dimensions d'aquest tag seran d'aproximadament $0.362\lambda \times 0.036\lambda$.



Taula 4.4 Resposta freqüencial del tag RFID (PET) II

4.4 Avaluació del rendiment

Un cop s'han dissenyat i implementat els tags **RFID** dels apartats 4.2 i 4.3, analitzarem el seu rendiment mitjançant la seva característica més important, això és, el *read range*. El *read range* és la màxima distància a la qual un lector **RFID** pot detectar el senyal reflectit (en anglès, *backscattered*) per un altre tag. Atès que és sensible a l'orientació del tag, al material on es col·loca l'etiqueta i a l'entorn de propagació, en aquest cas es considerarà que el lector i el tag estan orientats en la direcció de màxim guany i les seves polaritzacions coincideixen. [10]

A partir de l'equació de transmissió a l'espai lliure de **Friis** podem expressar el màxim rang d'abast r com

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{PIR E G_r \tau}{P_{th}}} \quad (8)$$

On λ és la longitud d'ona, P_t és la potència transmesa pel lector, G_t i G_r el guany de l'antena transmissora i receptora, respectivament, P_{th} la mínima potència d'activació del microxip del *tag* i τ el coeficient de transmissió de potència, donat per l'equació 9.

$$\tau = \frac{4R_{IC}R_A}{|Z_{IC} + Z_A|^2} = 1 - |S_{11}|^2 \quad (9)$$

Essent $Z_{IC} = R_{IC} + jX_{IC}$ la impedància del microxip i $Z_A = R_A + jX_A$ la impedància de l'antena. També cal destacar que la resistència de l'antena R_A es pot descomposar en dos termes diferents: la **resistència de pèrdues** (degut a la utilització de materials no ideals) i la **resistència de radiació** (que modela la potència que l'antena radia a l'espai).

D'altra banda, a la Figura 4.24 es mostra a nivell qualitatiu el comportament de la impedància de l'antena, la impedància del microxip i el *read range* d'un *tag* **RFID** en funció de la freqüència.

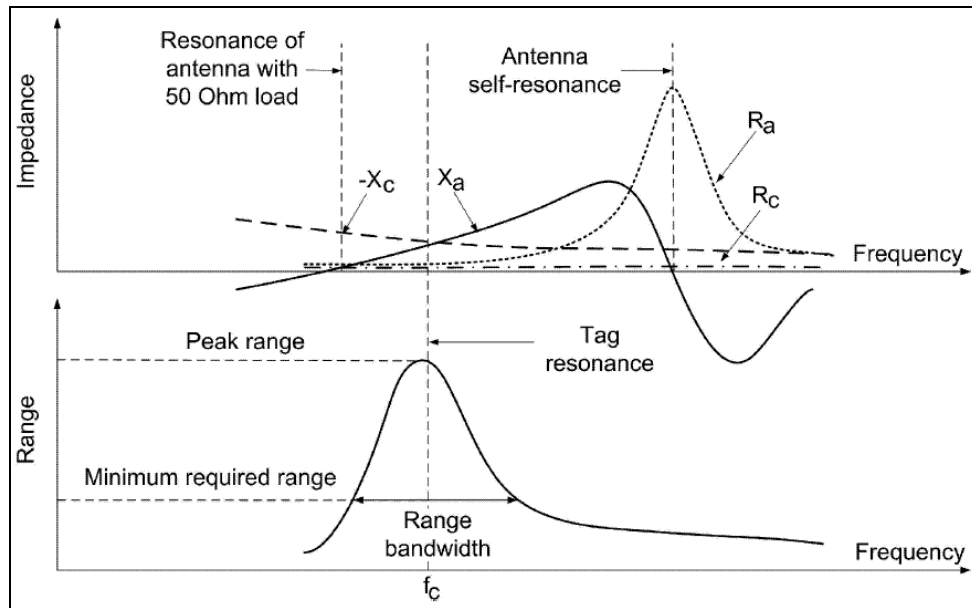


Figura 4.24 Z_{IC} , Z_A i rang d'abast d'una etiqueta en funció de la freqüència [\[IV\]](#)

Com es pot observar, el màxim rang d'abast (*peak range*) es produeix a la freqüència de ressonància del *tag*, mentre que l'ample de banda de lectura es defineix com la banda freqüencial en què l'etiqueta ofereix un *read range* acceptable.

Anàlogament, el coeficient de transmissió τ és un factor freqüencialment dominant atès que determina la ressonància del *tag*, això és, la freqüència de millor adaptació entre el microxip i l'antena. [\[1\]](#)

En aquestes circumstàncies, a partir dels resultats de les simulacions electromagnètiques de l'apartat 4.2, introduïrem les equacions 8 i 9 en el *Data Display Window* (així com els anteriors requisits de $P_{min} = -15$ dBm i **PIRE** = 3.3 W) i representarem el *read range* del *tag* de la Figura 4.7 en funció de la conductivitat de les diferents tintes i un substrat **Rogers RO3010**, com es pot comprovar a la Figura 4.25.

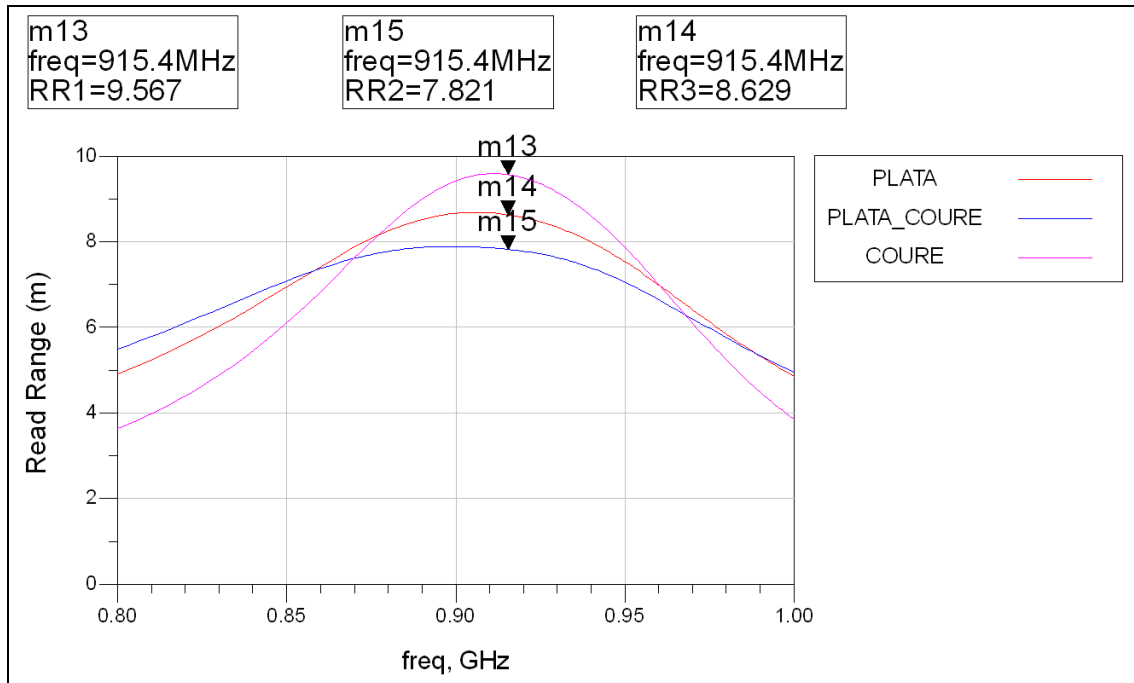


Figura 4.25 Read Range del tag de la Figura 4.7 (Rogers RO3010)

En aquest cas, l'etiqueta exhibeix un *read range* superior a 7 m aproximadament a tota la banda **UHF** (860 MHz – 960 MHz). A la freqüència de ressonància ($\tau = 1$), s'obté un abast màxim proper a 7.8 m i amb un valor major a 9.5 m per a una làmina de coure.

A continuació, realitzarem novament aquest procediment amb el *tag* de la Figura 4.14 (considerant un substrat **PET**), obtenint així el resultat de la Figura 4.26.

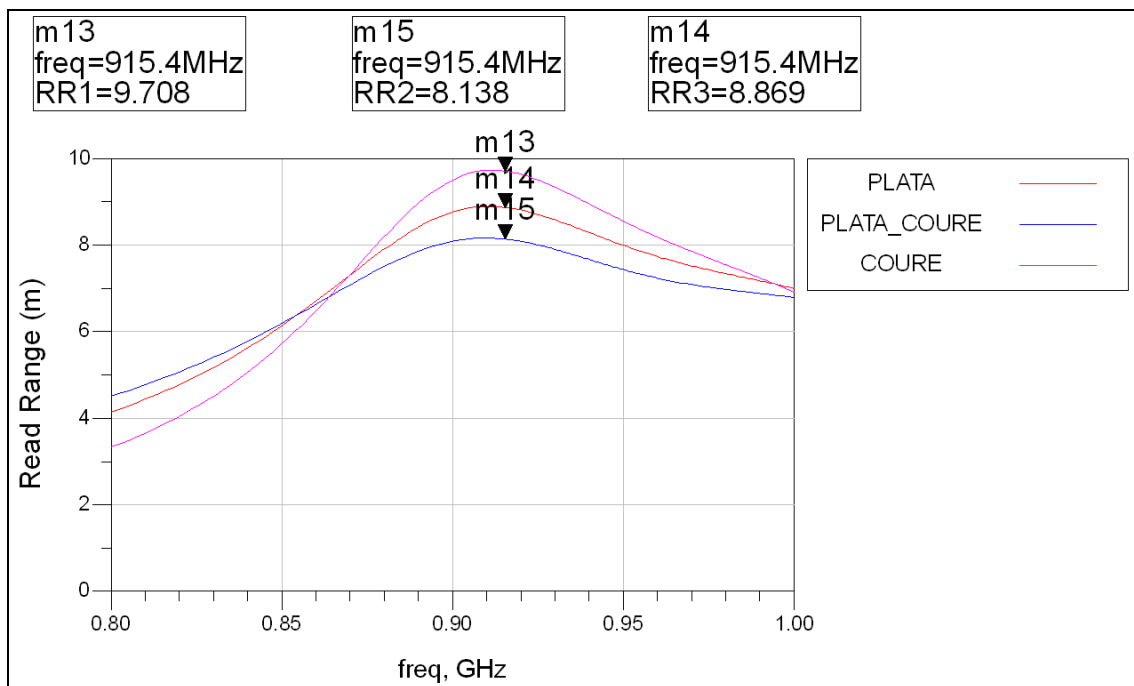


Figura 4.26 Read Range del tag de la Figura 4.14 (PET)

Aquesta etiqueta posseeix un rang de lectura lleugerament inferior al de la Figura 4.25 (aproximadament 6.5 m a la banda **UHF**). No obstant això, a 915 MHz mostra un valor màxim lleugerament major i pròxim a 9.7 m amb una làmina de coure.

En segon terme, mitjançant els resultats de les simulacions electromagnètiques de l'apartat 4.3, aquest cop representarem el *read range* del tag de la Figura 4.19, tal com s'il·lustra a la Figura 4.27.

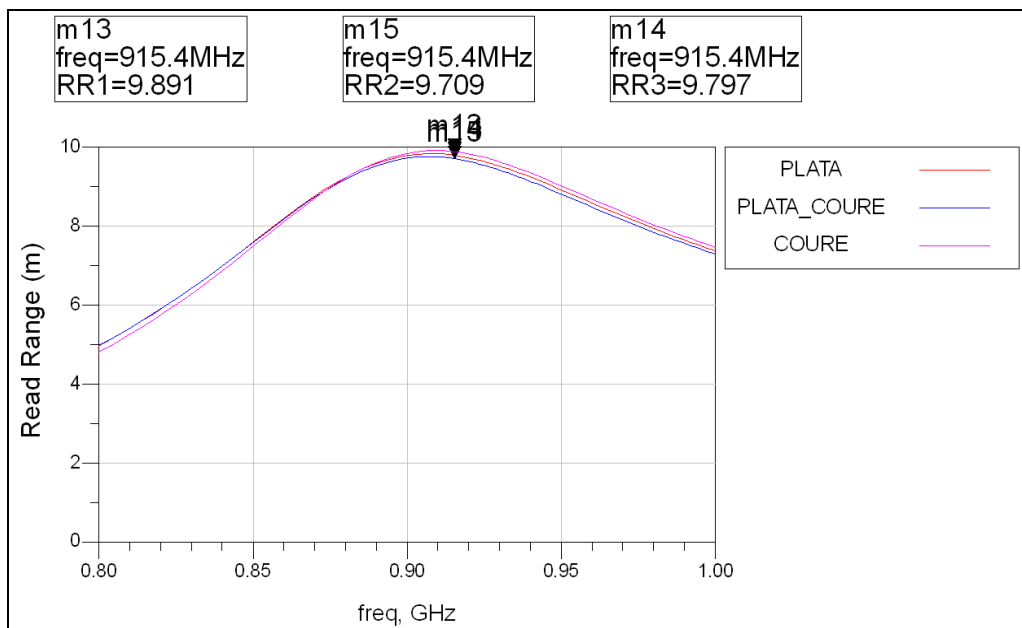


Figura 4.27 Read Range del tag de la Figura 4.19 (Rogers RO3010)

A diferència de la Figura 4.25 i 4.26, en aquest cas el rang de lectura és molt similar per a les tres classes de tintes i exhibeixen un valor superior a la banda de **UHF** (de 8.2 m aproximadament). Així mateix, a la freqüència de treball del tag s'obté un abast màxim major i al voltant de 9.8 m.

Finalment, realitzarem aquest procediment una altra vegada amb el tag de la Figura 4.23 (considerant un substrat **PET**), obtenint així el resultat de la Figura 4.28.

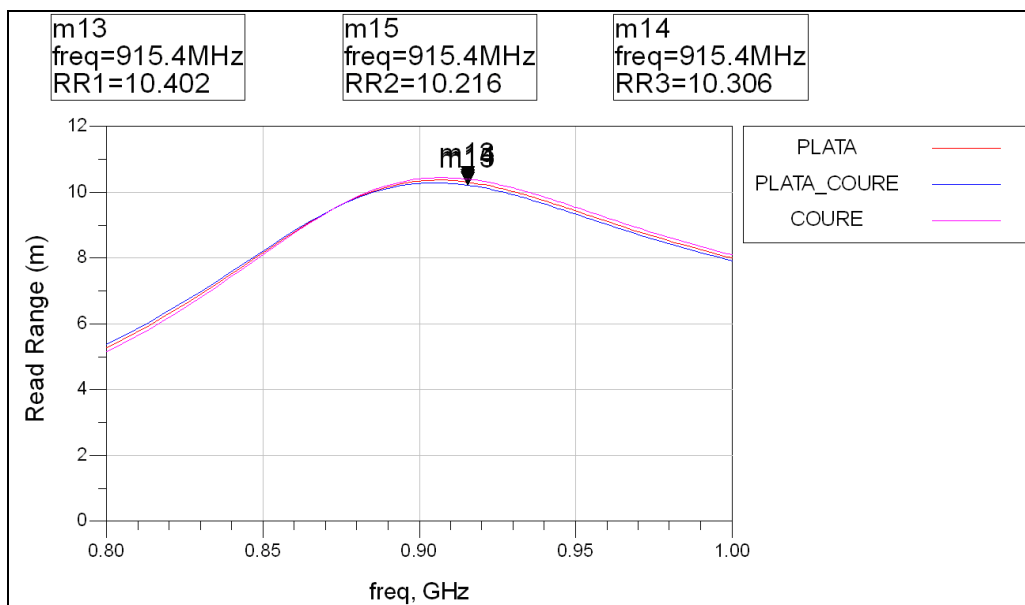


Figura 4.28 Read Range del tag de la Figura 4.23 (PET)

Com es pot apreciar, el *read range* és pràcticament idèntic al de la Figura 4.27, encara que ara el rang d'abast a la banda de **UHF** és lleugerament major (aproximadament de 8.8 m) i exhibeix un valor màxim a la freqüència d'operació superior a 10.2 m.

4.5 Bibliografia

Llibres i pàgines web:

- [1] K. V. Seshagiri Rao, P.V. Nikitin, and S.F. Lam, “*Antenna design for UHF-RFID tags: a review and a practical application*”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 53, pp. 3870-3876, December 2005.
- [2] Gerard Zamora et al., “*Design and Synthesis of UHF-RFID Tags Based on the T-match Network*”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, submitted.
- [3] G. Marrocco, “*The art of UHF-RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques*” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no. 1, pp. 66–79, Feb. 2008.
- [4] C. A. Balanis, “*Antenna Theory, Analysis and Design*”, 3rd ed., New York, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [5] Jia-Sheng Hong and M. J. Lancaster, “*Microstrip filters for RF/Microwave Applications*”, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [6] Deavours, D. D., “*Analysis and Design of Wideband Passive UHF-RFID Tags Using a Circuit Model*”, IEEE International Conference on RFID, 283-290, May 2009.
- [7] Naaser A. Mohamed, Kenneth R. Demarest, and Daniel D. Deavours, “*Analysis and Synthesis of UHF RFID Antennas using the Embedded T-match*”, IEEE International Conference on RFID, 187-194, June 2010.
- [8] http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3ICS1002_1202.pdf
- [9] Gerard Zamora et al., “*On the Bandwidth Limitations of UHF-RFID Tags*”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, submitted.
- [10] P.V. Nikitin and K. V. Seshagiri Rao, “*Antennas and Propagation in UHF RFID Systems*”, IEEE International Conference on RFID, pp. 277-288, 2008.

Imatges i taules:

- [I] Naaser A. Mohamed, Kenneth R. Demarest, and Daniel D. Deavours, “*Analysis and Synthesis of UHF RFID Antennas using the Embedded T-match*”, IEEE International Conference on RFID, 187-194, June 2010.
- [II] Gerard Zamora et al., “*Design and Synthesis of UHF-RFID Tags Based on the T-match Network*”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, submitted.
- [III] Gerard Zamora et al., “*On the Bandwidth Limitations of UHF-RFID Tags*”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, submitted.
- [IV] K. V. Seshagiri Rao, P.V. Nikitin, and S.F. Lam, “*Antenna design for UHF-RFID tags: a review and a practical application*”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 53, pp. 3870-3876, December 2005.

5. Implementació i resultats experimentals

Un cop dissenyades les etiquetes **RFID** i validades amb el *software ADS*, en aquest capítol es procedirà a realitzar la seva fabricació. La relació dels diferents materials utilitzats (proporcionats per l'empresa **Paymser** [11]) s'ha inclòs als annexes.

Posteriorment, per tal d'obtenir el *read range* d'aquests *tags*, s'analitzaran i descriuran els possibles sistemes de mesura existents.

5.1 Procés de fabricació i mesura

La implementació física dels diferents *tags RFID* del capítol 4 s'efectuarà mitjançant el mètode d'impressió exposat al subapartat 3.2.4 del capítol 3, això és, la serigrafia.

En primer terme, exportarem aquests models del *software ADS* a una màscara opaca emmarcada dins d'un quadre de fusta. A la seva cara posterior, es situarà una làmina molt prima de substrat **PET** de les mateixes dimensions.

A continuació, dipositarem la tinta conductora de plata i coure **R-40852** (és a dir, la **Tinta Serigràfica SC** de l'apartat 7.2) i l'estendrem per la superfície d'aquesta malla a partir d'un raser de goma, com es pot comprovar a la Figura 5.1.



Figura 5.1 Procés de fabricació de tags RFID amb serigrafia

Una vegada s'ha realitzat aquest procediment, es neteja la tinta de la màscara amb un dissolvent líquid, es retira la làmina de substrat **PET** amb els dissenys de les nostres etiquetes **RFID** i es deixa assecar durant un breu període de temps, tal com es pot apreciar a la Figura 5.2.

Paral·lelament, també s'ha pogut mesurar el gruix de la tinta conductora d'aquestes configuracions, obtenint així un valor d'aproximadament 12 μm .

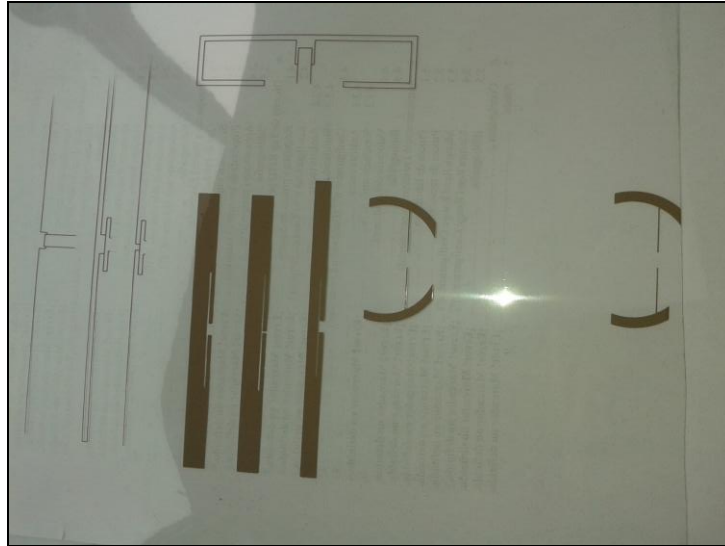


Figura 5.2 Etiquetes RFID impreses

En darrer terme, únicament resta incloure el microxip **ASIC** als diversos prototips de la Figura 5.2 mitjançant la seva soldadura al port de l'antena.

En relació amb l'avaluació del rendiment dels **tags RFID**, a la literatura es poden trobar tres estratègies distintes: la mesura de la seva impedància d'entrada i guany, la mesura del seu **RCS** (*Radar Cross Section*) o bé la mesura del seu rang de lectura. [2]

D'acord amb el capítol 4, utilitzarem la tècnica basada en l'obtenció del *read range*. Això es pot realitzar segons dos sistemes diferents: mitjançant una cambra anecoica o bé una cel·la **TEM** (*Transverse ElectroMagnetic*). [3]

També existeixen altres mètodes menys robustos que consisteixen en lectors **RFID** però el seu principal desavantatge és que només operen en un únic rang de freqüències.

Aquestes dues configuracions permeten tenir entorns electromagnèticament controlats (lliures d'interferències externes i reverberacions) on analitzar experimentalment el rang d'abast dels **tags** fixant la seva posició en la zona de camp llunyà i variant la potència de sortida d'un lector **RFID**, com s'il·lustra a la Figura 5.3.

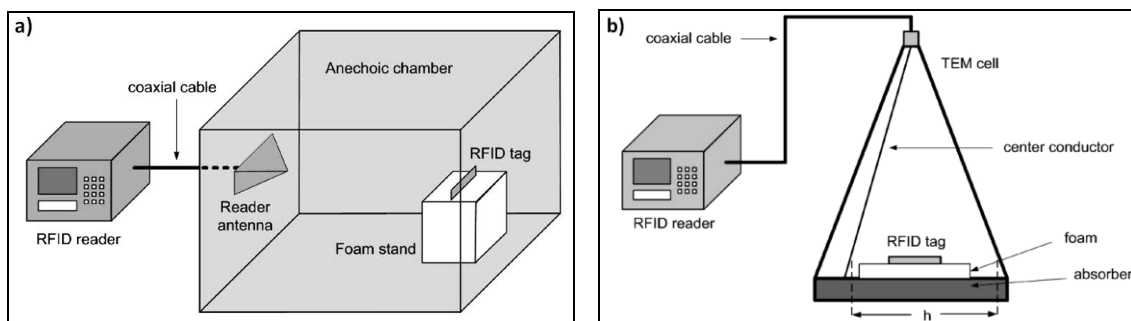


Figura 5.3 Mesura del read range amb cambra anecoica (a) i cel·la TEM (b) [1]

Normalment les cel·les **TEM** s'utilitzen en conjunció amb etiquetes petites, mentre que les cambres anecoiques es poden emprar per a mesurar el rendiment dels **tags RFID** en diversos objectes (encara que això també implica que el seu cost sigui més elevat), així com dur-hi a terme tests de compatibilitat electromagnètica **EMC**. [4]

Dit això, el sistema de mesura disponible al laboratori consta d'un generador de senyals vectorials **Agilent N5182A**, el qual crearà les trames **RFID** mitjançant un *software* específic de la companyia **Agilent** i realitzarà la funció d'un lector amb freqüència i potència de sortida variables. [3]

Aquestes trames (que estan acotades a una única freqüència) s'envien a un amplificador per tal d'augmentar el seu nivell de potència fins a un valor especificat i posteriorment es reenvien cap a la cel·la **TEM** a través del circulador. La funció d'aquest circulador és aïllar el generador de senyals de l'analitzador de senyals **Agilent N9020A** i evitar que el senyal provinent de la cel·la **TEM** es propagui cap al generador de senyals.

A continuació, es col·locarà l'etiqueta **RFID** a mesurar dins de la cel·la **TEM** en una determinada disposició en què el camp elèctric generat, al propagar-se del primer port al port amb una càrrega de $50\ \Omega$, pugi excitar-la (per tant, s'haurà de correspondre amb la orientació de la polarització del *tag*). Una vegada la trama arriba a la cel·la, el senyal guiat es converteix en senyal radiat permetent activar i alimentar l'etiqueta. [3]

Posteriorment, aquesta etiqueta **RFID** envia una resposta (modulada entre dos estats **RCS₁** i **RCS₂**) cap a l'analitzador de senyals vectorial per mitjà de modificar la seva impedància d'entrada. En tot moment, el *tag* també s'alimenta amb una ona contínua **CW**, com es pot observar a la Figura 5.4.

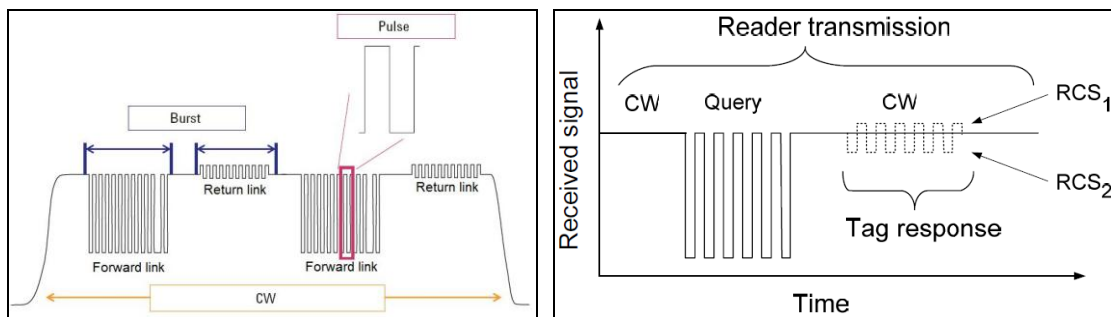


Figura 5.4 Intercanvi de dades entre lector (forward link) i tag (return link) [III] i [III]

A l'analitzador de senyals es processa aquesta resposta i primer es verifica si l'etiqueta ha emès una resposta. Si aquest *tag* no ha respost al senyal generat, es reenvia la mateixa trama **RFID** amb un increment de potència fins que l'etiqueta respon. Un cop l'etiqueta contesta, s'incrementa la freqüència d'aquesta trama i es repeteix tot el procés, efectuant així un escombrat freqüencial i en potència. [3]

Aquest procediment permet realitzar un mapeig de la mínima potència d'activació de l'etiqueta per a totes les freqüències d'interès. Finalment, es retira el *tag* **RFID** i es situa una sonda de camp elèctric a la mateixa posició amb la finalitat de mesurar el camp elèctric en aquest lloc, tal com es mostra a la Figura 5.5.

Per a fer això es reproduïxen tots els valors de freqüència i potència mínima guardats amb l'objectiu d'obtenir el camp elèctric E_{RMS} corresponent a uns determinats valors de freqüència i potència. [3]

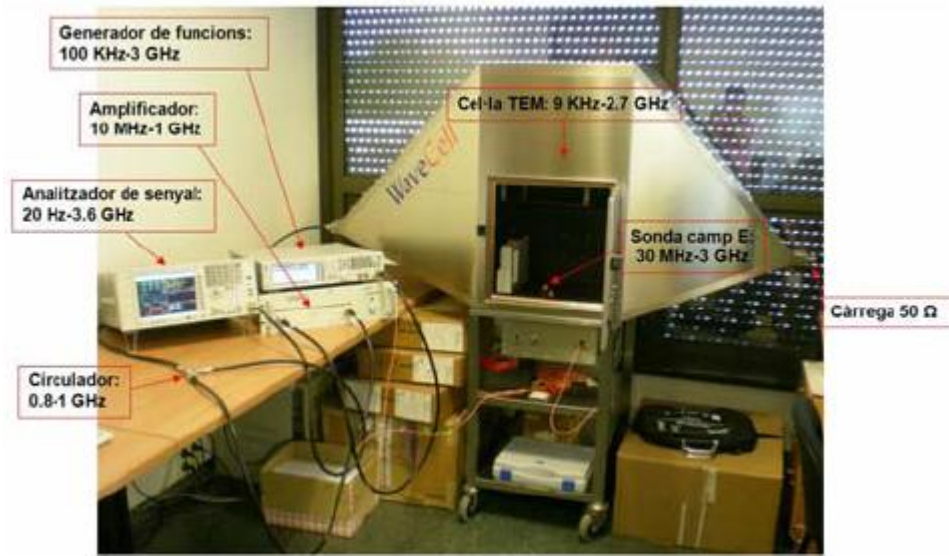


Figura 5.5 Sistema de mesura RFID basat en una cel·la TEM [IV]

En aquestes circumstàncies, a partir de l'expressió 8 podem deduir l'equació 10, que en aquest cas ens possibilitarà el càlcul experimental del *read range*.

$$r = \frac{\sqrt{30 P_{IRE}}}{E_{RMS}} \quad (10)$$

No obstant això, s'han efectuat algunes proves de mesura mitjançant aquesta tècnica i s'han detectat els **tags RFID** amb una distància menor a l'esperada. Això pot ser degut a un desplaçament freqüencial ja que la lectura es realitza al voltant del 3 m a 1 GHz (freqüència límit de funcionament del microxip) i disminueix conforme es redueix la freqüència.

Per tant, aquest fet impossibilita l'ús de la cel·la **TEM** i, per tal d'obtenir les mesures del rang de detecció, s'ha d'emprar un amplificador i un lector comercial. Tot i així, en el marc d'aquest projecte aquest segon procés no s'ha pogut realitzar, motiu pel qual no s'ha pogut incloure cap resultat.

5.2 Bibliografia

Llibres i pàgines web:

- [1] <http://www.paymser.com/>
- [2] G. Marrocco, “*The art of UHF-RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques*” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no. 1, pp. 66–79, Feb. 2008.
- [3] F. Paredes Marco, “*Disseny i caracterització d’etiquetes d’identificació per radiofreqüència (RFID) de doble banda basades en conceptes de metamaterials*”, Tesi del Doctorat en Enginyeria Electrònica, Escola d’Enginyeria, Universitat Autònoma de Barcelona, 2012.
- [4] K. V. Seshagiri Rao, P.V. Nikitin, and S.F. Lam, “*Antenna design for UHF-RFID tags: a review and a practical application*”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 53, pp. 3870-3876, December 2005.

Imatges i taules:

- [I] K. V. Seshagiri Rao, P.V. Nikitin, and S.F. Lam, “*Antenna design for UHF-RFID tags: a review and a practical application*”, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 53, pp. 3870-3876, December 2005.
- [II] P.V. Nikitin and K. V. Seshagiri Rao, “*Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags*”, Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 48, pp. 212-218, 2006.
- [III] C. H. Loo et al., “*Chip impedance matching for UHF RFID tag antenna design*”, Progress in Electromagnetics Research-Pier, vol. 81, pp. 359-370, 2008.
- [IV] F. Paredes Marco, “*Disseny i caracterització d’etiquetes d’identificació per radiofreqüència (RFID) de doble banda basades en conceptes de metamaterials*”, Tesi del Doctorat en Enginyeria Electrònica, Escola d’Enginyeria, Universitat Autònoma de Barcelona, 2012.

6. Conclusions

L'objectiu d'aquest projecte ha estat l'estudi de *Printed Electronics* com a tecnologia de fabricació d'etiquetes **RFID**. Per aquest motiu, s'han analitzat i dissenyat diferents configuracions de *tags RFID* per a la banda **UHF** sobre diverses classes de substrats (**Rogers RO3010** i **PET**) i tintes conductores. Posteriorment, s'ha realitzat la seva fabricació mitjançant la tècnica d'impressió basada en la serigrafia.

En primer terme, a partir de dos dissenys ja existents a la literatura, aquestes etiquetes s'han modelat electromagnèticament amb el *software ADS* i s'ha simulat la seva resposta freqüencial. En ambdós casos les mides dels *tags* resultants són bastant reduïdes i similars (encara que els de l'apartat 4.3 són la meitat d'ample) i tots ells posseeixen un guany pròxim a la unitat i de valor màxim 1.5 per a les etiquetes del subapartat 4.3.2 amb substrat **PET**.

A continuació, a fi d'avaluar el seu rendiment, també s'ha representat el *read range* d'aquests *tags RFID* en funció de les diferents tintes conductores i substrats.

En el cas de les etiquetes de l'apartat 4.2, mitjançant els dos substrats podem obtenir un rang de lectura superior a 6.5 m dins de la banda **UHF**, així com un abast màxim a la freqüència de treball al voltant de 7.9 m (tinta de plata) i 9.6 m (làmina de coure) aproximadament.

En relació amb els *tags RFID* de l'apartat 4.3, aquests exhibeixen un rang de detecció molt similar i major a 8 m a la banda **UHF** per a les dues classes de substrats, així com un valor màxim a 915 MHz situat entre aproximadament 9.7 m (tinta de plata) i 10.4 m (làmina de coure).

Finalment, s'ha realitzat la implementació física d'aquestes etiquetes **RFID** segons el sistema serigràfic d'impressió, però degut a la manca de temps i d'altres circumstàncies, no ha sigut possible mesurar empíricament el seu comportament real.

En aquestes circumstàncies, en base a aquests resultats podem concloure que els nostres *tags RFID* mostren un *read range* bastant significatiu a la banda **UHF** i que, per tant, és factible utilitzar la tecnologia de *Printed Electronics* per a la realització d'etiquetes.

No obstant això, a falta d'una verificació experimental del seu rang de lectura així com d'altres aspectes rellevants (viabilitat econòmica, etc...), únicament podem realitzar afirmacions a nivell teòric i/o de simulació.

Generalment, cal destacar que aquestes simulacions ens han permès completar la configuració dels *tags RFID* de manera dinàmica i flexible. Tanmateix, cal tenir present que poden existir petites discrepàncies pel que fa als models reals pel fet que no tots els possibles aspectes del disseny es prenen en consideració (p. ex. una variació en la impedància del microxip durant la fabricació o bé una tolerància en el valor de la permitivitat del substrat).

Dit això, per tal de realitzar un estudi més exhaustiu, podem establir clarament una línia futura de desenvolupament i millora d'aquest projecte.

Algunes propostes a considerar inclouen efectuar la mesura experimental del rang d'abast d'aquestes etiquetes **RFID** o bé dissenyar altres *tags* que puguin operar a més d'una banda freqüencial o bé amb dues polaritzacions.

A nivell personal, la principal dificultat que s'ha presentat al llarg d'aquest projecte ha estat familiaritzar-se amb el *software* utilitzat i entendre amb exactitud els conceptes relacionats amb **RFID** i *Printed Electronics*. En ambdós casos, únicament ha estat necessari dedicar suficient temps a aquestes qüestions.

Així mateix, això m'ha permès adquirir una important experiència en aquests camps, així com aprofundir i aprendre a desenvolupar-me amb el *software* **ADS**.

7. Annexes

7.1 Características de les tintes conductores (I)

TINTA CONDUCTIVA SERIGRAFICA SC

DESCRIPCION

Tinta serigráfica conductiva para la impresión de circuitos electrónicos, circuitos flexibles, displays, etc.

CARACTERÍSTICAS

- Formulación en base solvente con partículas de cobre y plata
- Temperatura de secado: 70°C
- Tiempo de secado: 2-7 minutos dependiendo del espesor aplicado y del flujo de aire.
- Viscosidad: 15.000 cps
- Resistividad..... 93.00 $\mu\Omega$ cm
- Resistividad superficial..... 0.025 Ω
- Capacidad..... 3.10 W
- Densidad corriente máxima..... 177.00 mA/cm²

CONDICIONES DE IMPRESIÓN

- Mesh: 100 hilos/cm o menos
- Pantallas de poliéster o acero inoxidable
- Limpieza con glicol éter PM, MEK o acetato de n-propilo

Toda la información está basada en resultados de la experiencia y pruebas, por lo que creemos que es exacta, pero no supone la aceptación de responsabilidades basadas en ella, porque las condiciones de uso están fuera de nuestro control

7.2 Característiques de les tintes conductores (II)

TINTA CONDUCTIVA SERIGRAFICA SX

DESCRIPCION

Tinta serigráfica conductiva para la impresión de circuitos electrónicos, circuitos flexibles, displays, etc.

CARACTERÍSTICAS

- Formulación en base solvente con partículas de plata.
- Temperatura de secado: 70°C
- Tiempo de secado: 2-7 minutos dependiendo del espesor aplicado y del flujo de aire.
- Viscosidad: 23.000 cps
- Resistividad..... 29.00 $\mu\Omega$ cm
- Resistividad superficial..... 0.01 Ω
- Capacidad..... 2.20 W
- Densidad corriente máxima..... 313.00 mA/cm²

CONDICIONES DE IMPRESIÓN

- Mesh: 100 hilos/cm o menos
- Pantallas de poliéster o acero inoxidable
- Limpieza con glicol éter PM, MEK o acetato de n-propilo

Toda la información está basada en resultados de la experiencia y pruebas, por lo que creemos que es exacta, pero no supone la aceptación de responsabilidades basadas en ella, porque las condiciones de uso están fuera de nuestro control

FIRMA DE L'AUTOR:

PAU AGUILÀ MOLINER

Resum:

*En aquest projecte s'han dissenyat i simulat diferents models de tags **RFID** per a la banda **UHF** sobre diferents classes de substrats i tintes conductores amb l'objectiu d'estudiar la viabilitat de la tecnologia de Printed Electronics per a la seva d'implementació física.*

*A partir de dues configuracions ja existents a la literatura, aquestes etiquetes **RFID** s'han modelat electromagnèticament mitjançant el software **ADS** i s'ha simulat la seva resposta freqüencial. En segon terme, a fi d'avaluar el seu rendiment, també s'ha representat el read range d'aquests tags **RFID** en funció d'aquestes tintes conductores i substrats. Posteriorment, s'han realitzat diferents proves de fabricació mitjançant un mètode basat en la serigrafia, així com d'obtenció experimental de la seva distància de lectura.*

*Finalment, en base als resultats obtinguts s'ha pogut concloure que és viable realitzar tags **RFID** segons aquesta tècnica d'impressió, però a falta d'una verificació experimental únicament a nivell de simulació.*

Resumen:

*En este proyecto se han diseñado y simulado diferentes modelos de tags **RFID** para la banda **UHF** sobre diferentes clases de substratos y tintas conductoras con el objetivo de estudiar la viabilidad de la tecnología de Printed Electronics para su implementación física.*

*A partir de dos configuraciones ya existentes en la literatura, estas etiquetas **RFID** se han modelado electromagnéticamente mediante el software **ADS** y se ha simulado su respuesta en frecuencia.*

*En segundo término, a fin de evaluar su rendimiento, también se ha representado el read range de estos tags **RFID** en función de estas tintas conductoras y substratos. Posteriormente, se han realizado diferentes pruebas de fabricación mediante un método basado en la serigrafía, así como de obtención experimental de su distancia de lectura.*

*Finalmente, en base a los resultados obtenidos se ha podido concluir que es viable realizar tags **RFID** según esta técnica de impresión, pero a falta de una verificación experimental únicamente a nivel de simulación.*

Summary:

*In this project different models of **UHF-RFID** tags has been designed and simulated on different types of substrates and conductive inks in order to study the feasibility of Printed Electronics technology for its physical implementation.*

*From two existing configurations present in the literature, these **RFID** tags have been electromagnetically modeled using the **ADS** software and its frequency response has been simulated.*

*Also, in order to evaluate its performance, the read range of such **RFID** tags has been represented according to these conductive inks and substrates. Thereafter, manufacturing tests have been done using a method based on screen printing, as well as for obtaining the experimental reading distance.*

*Finally, based on the obtained results it can be concluded that it is feasible to do **RFID** tags according to this printing technique, but in absence of an experimental verification only at simulations.*